



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**EMANUEL DIAS FREITAS**

**IMPACTO DE FRAÇÕES DE LIXIVIAÇÃO NO ACÚMULO DE SAIS, EFICIÊNCIA  
DO USO DA ÁGUA E PERDAS DE NUTRIENTES EM MILHO SOB ESTRESSE  
SALINO**

**FORTALEZA**

**2020**

EMANUEL DIAS FREITAS

IMPACTO DE FRAÇÕES DE LIXIVIAÇÃO NO ACÚMULO DE SAIS, EFICIÊNCIA  
DO USO DA ÁGUA E PERDAS DE NUTRIENTES EM MILHO SOB ESTRESSE  
SALINO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor. Área de Concentração: Irrigação e Drenagem.

Orientador: Prof. Dr. Claudivan Feitosa de Lacerda

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

F936i Freitas, Emanuel Dias.

Impacto de frações de lixiviação no acúmulo de sais, eficiência do uso da água e perdas de nutrientes em milho sob estresse salino / Emanuel Dias Freitas. – 2020.

117 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2020.

Orientação: Prof. Dr. Claudivan Feitosa de Lacerda.

1. Balanço hídrico do solo. 2. Salinidade. 3. Irrigação. 4. Lixiviação. 5. *Zea mays*. I. Título.

CDD 630

---

EMANUEL DIAS FREITAS

IMPACTO DE FRAÇÕES DE LIXIVIAÇÃO NO ACÚMULO DE SAIS, EFICIÊNCIA  
DO USO DA ÁGUA E PERDAS DE NUTRIENTES EM MILHO SOB ESTRESSE  
SALINO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor. Área de Concentração: Irrigação e Drenagem.

Aprovada em: 15/12/2020.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Claudivan Feitosa de Lacerda (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra Aiala Vieira Amorim  
Universidade da Integração Inter. da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

---

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

---

Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Hans Raj Gheyi  
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

---

Prof. Dr. Jorge Freire da Silva Ferreira  
USDA - ARS - US Salinity Laboratory

Aos meus pais José Cláudio e Maria Lúcia  
pelo amor, educação, cuidado e amparo  
em todos os momentos da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, em primeiro lugar, pela força e coragem durante toda esta caminhada e por me proporcionar tantas oportunidades.

À minha esposa Juliana Vieira pela amizade, amor, cumplicidade e incentivo que tenho recebido durante mais de 13 anos. Além disso, agradeço a ajuda em todas as etapas do meu experimento.

Ao meu irmão, Elton Dias pela amizade e parceria ao longo de três décadas.

Ao Instituto Federal do Ceará, meu segundo lar, que me proporciona a cada dia o valioso sentimento de contribuição com a sociedade.

À Universidade Federal do Ceará e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pelo conhecimento e qualificação que tanto contribuiu para minha formação profissional e pessoal.

Ao Professor Dr. Claudivan Lacerda pela amizade, paciência e ensinamentos a mim direcionados. E, acima de tudo, por ter aceitado o convite de orientação de um até então desconhecido.

Aos Professores (a) Dra. Aiala Vieira Amorim, Dr. Alexsandro Oliveira da Silva, Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa, Dr. Hans Raj Gheyi e Jorge Freire da Silva Ferreira por aceitar prontamente o convite para contribuir com esse trabalho.

Aos professores dos Departamentos de Engenharia Agrícola e de Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará que tanto contribuíram para meu crescimento profissional.

Ao professor Dr. Paulo Furtado Mendes Filho por ter acreditado no meu potencial ainda na época de graduação. Além dos conselhos, atenção e amizade construída desde 2007.

Aos companheiros de laboratório, Bruno Gabriel (meu braço direito na execução do experimento), Adriana Oliveira, Aureliano Ribeiro, Carlos Henrique, Flávio, Júlia Medeiros, Leila Neves, Mardônio e Saúde Ribeiro que contribuíram em diversos momentos para a realização deste trabalho.

Aos amigos que fiz durante minha vida acadêmica, Dimitri Matos, Deivielson Ximenes, Viviane Castro, Alexandre Reuber, Thiago Costa, Izabel Almeida, Régis Braz, Ronaldo Oliveira, Aldênia Mendes, Leo Jackson, Ana Leônia, Rodrigo Girão, Thiago "Shortinho", Gabriel Nuto, Gislaine Brito e Daniel Pontes pela convivência e momentos de descontração.

Aos amigos do IFCE, Ítalo Lima, João Henrique, Lee Marx, Nara Lúcia, Levi, João Nunes, Joaquim Batista (*in memoriam*), Aglodualdo Jr., Fausto, Tony, Wagner, Gilvan, Liandro, Breno e Marcos Lima.

Aos amigos do Rancho Caveirão, Jefté, Mateus, Lucas, Roney, João Helder e Rafael pelo companheirismo e momentos de descontração.

Aos meus alunos que certamente me ensinam mais do que eu a eles.

Aos meus filhos de quatro patas, Snoopy, Lola e Bruce (*in memoriam*) pela companhia, amor e alegria que trouxeram a minha casa.

Obrigada a todos que, mesmo não estando citados aqui, tanto contribuíram para a conclusão desta etapa e para a pessoa que sou hoje.

## RESUMO

O uso de água salina na agricultura é uma prática recorrente em regiões com escassez hídrica. No intuito de amenizar os efeitos negativos que a presença de sais provoca nas culturas, um dos métodos mais utilizados é a aplicação da fração de lixiviação (FL). Entretanto, a depender da quantidade de água utilizada na FL, esse método pode contribuir para prejuízos econômicos e ambientais. Diante disso, objetivou-se com o presente trabalho avaliar como as FL impactam no acúmulo de sais, eficiência do uso da água (EUA) e perdas de nutrientes em milho submetido ao estresse salino. Para isso, foram analisadas variáveis fisiológicas, de crescimento e produção em plantas de milho (BRS 2020) cultivadas em colunas de solo. Em adição, para o estudo das perdas de nutrientes e acúmulo de sais no sistema, avaliou-se também a concentração de elementos químicos nas folhas do milho, no lixiviado e no solo. O experimento foi instalado na área da Estação Meteorológica da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, em delineamento inteiramente casualizado, composto por 4 níveis de salinidade da água de irrigação –  $CE_a$  (0,5, 2,0 4,0 e 6,0 dS  $m^{-1}$ ), 2 formas de determinação da FL e 7 repetições. As parcelas experimentais foram compostas por uma coluna de solo cultivada com milho. As FL foram calculadas por dois métodos: AS - Aplicação da FL para cada nível de salinidade, de acordo com a fórmula proposta por Rhoades; BS - Aplicação da FL de 15% calculada a partir do balanço hídrico do solo das parcelas experimentais. Foram avaliadas: variáveis na planta (crescimento, trocas gasosas, índice de clorofila, produção, EUA e teores foliares de elementos químicos), variáveis no lixiviado ( $NO_3$ , K, P, Ca, Mg, Na,  $Cl^-$ , relações Na/K e  $NO_3/Cl^-$ ) e no solo em diferentes camadas (pH, CE, N, K, P, Ca, Mg, Na e  $Cl^-$ ). Para todas as variáveis de crescimento e produção não houve diferença entre os métodos de determinação da FL. No tratamento AS, observou-se maior condutância estomática, menor concentração de K foliar, maior lixiviação de N, P e K e menor EUA. Em BS, verificou-se os maiores níveis de elementos químicos nas folhas do milho e maior acúmulo de N no solo. Independente dos métodos de determinação da FL, as concentrações foliares de N, P e K diminuíram em função do aumento da salinidade da água de irrigação. No solo, constatou-se o acúmulo de K, Na, Mg e  $Cl^-$  em profundidade. Além disso, com exceção do K, observou-se o aumento dos níveis desses íons à medida que se aplicava água mais salina. Desta forma, concluiu-se que o método BS para o milho submetido às condições deste experimento



apresentou maior EUA, menores perdas de nutrientes e menor consumo de água e não deferiu dos resultados de AS em relação ao crescimento e produção da planta.

**Palavras-chaves:** Balanço hídrico do solo. Salinidade. Irrigação. Lixiviação. *Zea mays*.

## ABSTRACT

The use of saline water in agriculture is a recurrent practice in regions with water scarcity. In order to mitigate the negative effects that the presence of salts causes in crops, one of the most used methods is the application of the leaching fraction (LF). However, depending on the amount of water used in LF, this method can contribute to economic and environmental losses. Therefore, the aim with this study was to evaluate how the LF impact the salt accumulation, water use efficiency (WUE) and loss of nutrients in maize submitted to salt stress. For this, physiological, growth and yield variables in maize plants (BRS 2020) grown in soil columns were analyzed. In addition, for the study of nutrient losses and salt accumulation in the system, the concentration of chemical elements in the leaves of maize, in the leachate and in the soil were also evaluated. The experiment was installed in the area of the Meteorological Station of the Federal University of Ceará, Pici campus, Fortaleza - CE, in a completely randomized design, composed of 4 salinity levels of irrigation water -  $EC_w$  (0.5, 2.0, 4.0 and 6.0  $dS\ m^{-1}$ ), 2 methods of determining the leaching fraction and 7 replications. The experimental plots were composed of a soil column grown with maize. The LF were determined by two methods: AS - Application of LF calculated for each level of salinity, according to the formula proposed by Rhoades; BS - Application of 15% LF calculated from the soil water balance of the experimental plots. The following variables were evaluated: plant variables (growth, gas exchange, chlorophyll index, yield, WUE and leaf contents of chemical elements), leachate variables (pH, EC,  $NO_3$ , K, P, Ca, Mg, Na,  $Cl^-$ , Na/K e  $NO_3/Cl^-$  ratios) and soil in different layers (pH, EC, N, K, P, Ca, Mg, Na e  $Cl^-$ ). For all growth and yield variables, there was no difference between the methods of determining LF. In the AS treatment, higher stomatal conductance, lower leaf K concentration, higher N, P and K leaching and lower WUE were observed. In BS, there was a higher level of chemical elements in the leaves of maize and a greater accumulation of N in the soil. Regardless of the LF determination methods, the leaf concentrations of N, P and K decreased due to the increase in salinity of the irrigation water. In the soil, K, Na, Mg and  $Cl^-$  accumulated in depth. Furthermore, with the exception of K, there was an increase in the levels of these ions as more saline water was applied. In this way, it was concluded that the BS method for maize submitted to the conditions of this experiment presented greater WUE, lesser nutrient losses and

lesser water consumption and did not differ from the results of AS in relation to plant growth and yield.

**Keywords:** Soil water balance. Salinity. Irrigation. Leaching. *Zea mays*.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AF	Área foliar
CE <sub>a</sub>	Condutividade elétrica da água
CE <sub>es</sub>	Condutividade elétrica do extrato de saturação do solo
CO	Carbono orgânico
CTC	Capacidade de troca catiônica
CV	Coefficiente de variação
DAS	Dias após a semeadura
DIC	Delineamento inteiramente casualizado
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EUA	Eficiência do uso da água
FL	Fração de lixiviação
FV	Fonte de variação
IRC	Índice relativo de clorofila
PA	Puro para análise
PSS	Percentual de saturação por sódio
SiBCS	Sistema brasileiro de classificação de solo
UFC	Universidade Federal do Ceará

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL .....	12
2	CRESCIMENTO, RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E PRODUÇÃO DO MILHO IRRIGADO COM ÁGUAS DE DIFERENTES SALINIDADES E SOB FRAÇÕES DE LIXIVIAÇÃO DETERMINADAS POR DOIS MÉTODOS.....	16
3	EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA E PERDA DE NUTRIENTES EM COLUNAS DE SOLO CULTIVADAS COM MILHO SOB DIFERENTES SALINIDADES E FRAÇÕES DE LIXIVIAÇÃO.....	39
4	IMPACTOS DE FRAÇÕES DE LIXIVIAÇÃO NA DINÂMICA DOS ELEMENTOS QUÍMICOS EM COLUNAS DE SOLO CULTIVADAS COM MILHO IRRIGADO COM ÁGUAS SALINAS.....	76
5	CONCLUSÕES GERAIS.....	109
	REFERÊNCIAS.....	110

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A salinidade é um dos fatores abióticos que mais impacta o rendimento das culturas agrícolas. Contudo, devido às extensas áreas salinizadas no mundo, a prática da agricultura em ambiente salino é uma realidade. De acordo com Pessarakali e Szabolcs (1999) e Beltrán (2016), com exceção da Antártica, todos os continentes do globo apresentam áreas com problema de salinização do solo.

No Brasil, o Nordeste é a região de maior ocorrência de áreas salinizadas (RIBEIRO *et al.*, 2003; RIBEIRO, RIBEIRO FILHO e JAKOMINE, 2016). O processo de salinização observado nessa região, deve-se, principalmente, as condições climáticas onde a evapotranspiração é superior a precipitação. Deste modo, é comum que ocorra a translocação de sais de camadas mais profundas para a superfície do solo devido a ascensão capilar. Esse fenômeno costuma ser agravado em áreas agrícolas devido a prática da irrigação com água salina (RHOADES, KANDIAH e MARSHALI, 2000; RIBEIRO, RIBEIRO FILHO e JAKOMINE, 2016).

O baixo rendimento das culturas submetidas ao estresse salino deve-se a diversas causas tais como: redução do potencial osmótico do solo, toxicidade iônica (principalmente provocadas pelo sódio e cloro) e o desequilíbrio nutricional. Esses fatores por sua vez, afetam a assimilação líquida de CO<sub>2</sub>, inibem a expansão foliar e aceleram a senescência das folhas. Desta forma, ocorre decréscimo na produção de fotoassimilados que se reflete em prejuízo no crescimento e produção do vegetal (AZEVEDO NETO e TABOSA, 2000; MUNNS e TESTER, 2008; LACERDA *et al.*, 2016; SOARES FILHO *et al.*, 2016).

A severidade dos danos que a salinidade pode causar às plantas é fruto da interação de diversas variáveis, tais como, genótipo, fase fenológica, tipo de solo, adubação mineral e a concentração de sais no solo e na água de irrigação. Segundo Maas e Hoffman (1977) as culturas podem ser classificadas desde sensíveis até tolerantes à salinidade. Essa classificação leva em consideração o rendimento relativo das culturas em função da salinidade da água de irrigação (CE<sub>a</sub>) e/ou do extrato de saturação do solo (CE<sub>es</sub>). O milho, por exemplo, é considerado uma cultura moderadamente sensível a salinidade, sendo que a salinidade limiar é de 1,1 dS m<sup>-1</sup> para a água de irrigação e de 1,7 dS m<sup>-1</sup> para a condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (AYERS e WESTCOT, 1985).

O milho (*Zea Mays* L.) é uma cultura amplamente explorada no Brasil. O interesse econômico que o vegetal desperta, deve-se a ampla possibilidade de emprego da cultura que vai desde o uso como alimento, como para uso industrial e energético (SOLOGUREN, 2015). Apesar de adaptada às condições edafoclimáticas de todo o território brasileiro, a produção e produtividade do milho no Nordeste é baixa quando comparada a outras regiões do país. Os principais motivos para essa baixa produção é a escassez de água e a qualidade do solo, notadamente em cultivos de sequeiro (IPECE, 2017).

Ao longo de décadas, estudos foram realizados no intuito de indicar métodos que permitam a utilização de água salina como alternativa à falta de água de baixa salinidade para irrigação. Tais métodos ou técnicas podem reduzir o potencial de danos do estresse salino às plantas, bem como amenizar os impactos sobre o ambiente. Dentre os vários métodos, a fração de lixiviação é a mais conhecida (RHOADES, 1974; AYERS e WESTCOT, 1985; BERNARDO *et al.*, 2019). Apesar da resposta positiva para a remoção dos sais com o aumento da fração de lixiviação adotada, o emprego de lâminas de água elevadas, pode aumentar consideravelmente as perdas de nutrientes do solo quando as plantas estão submetidas ao estresse salino (LACERDA *et al.*, 2018).

Diante do exposto, testou-se as seguintes hipóteses: (i) o método de cálculo da fração de lixiviação altera a resposta do milho à salinidade; (ii) o aumento da fração de lixiviação diminui a eficiência do uso da água e aumenta as perdas de nutrientes do solo por lixiviação; e (iii) diferentes salinidades da água de irrigação e diferentes frações de lixiviação alteram a concentração dos elementos químicos dentro do perfil de solo.

Desta forma, objetivou-se avaliar os efeitos da fração de lixiviação determinada por dois métodos no crescimento, respostas fisiológicas, eficiência do uso da água e produção do milho submetido a diferentes salinidades da água de irrigação. Além disso, avaliou-se as perdas de macronutrientes por lixiviação e o acúmulo de sais nas camadas de solo.

## REFERÊNCIAS

- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **Water quality for agriculture**. FAO Irrigation and Drainage Paper 29. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985. 174 p.
- AZEVEDO NETO, A. D.; TABOSA, J. N. Estresse salino em plântulas de milho: parte II. Distribuição dos macronutrientes catiônicos e suas relações com sódio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, p.165-171, 2000.
- BELTRÁN, J. M. Integrated approach to address salinity problems in irrigated agriculture. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. DA S.; LACERDA, C. F. DE; GOMES FILHO, E (ed.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 2. ed. Fortaleza: INCTSal, 2016. Cap. 1, p.3 – 8.
- BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C; SILVA, D. D.; SOARES, A. A. **Manual de irrigação**. 9. ed. Viçosa: Editora UFV, 2019. 545 p. il.
- IPECE- Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Indicadores Econômicos do Ceará 2017**. Fortaleza: IPECE, 2017. 107 p.
- LACERDA, C. F. DE; FERREIRA, J. F. S.; LIU, X.; SUAREZ, D. L. Evapotranspiration as a criterion to estimate nitrogen requirement of maize under salt stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**, [s. l.], v.202, p.192-202, 2016.
- LACERDA, C. F. DE; FERREIRA, J. F. S.; SUAREZ, D. L.; FREITAS, E. D.; LIU, X. Evidence of nitrogen and potassium losses in soil columns cultivated with maize under salt stress. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 8, p. 553-557, 2018.
- MAAS, E. V.; HOFFMAN, G. J. Crop salt tolerance - current assessment. **Jornal of Irrigation and Drainage Division**, ASCE 103, 1977, p. 115-134.
- MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, [s. l.], v. 59, p. 651-668, 2008.
- RHOADES, J. D.; KANDIAH, A. M.; MARSHALI, A. M. **Uso de águas salinas para produção agrícola**. Campina Grande: UFPB, 2000, 117 p.
- RIBEIRO, M. R.; FREIRE, F. J.; MONTENEGRO, A. A. Solos halomórficos no Brasil: ocorrência, gênese, classificação, uso e manejo sustentável. *In*: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERMES, L. R. G. G.; LIMA, J. M.; LOPES A. S.; ALVAREZ, V. H. (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v.3, p.165-208.
- RIBEIRO, M. R.; RIBEIRO FILHO, M. R.; JACOMINE, P. K. T. Origem e classificação dos solos afetados por sais. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. DA S.; LACERDA, C. F. DE; GOMES FILHO, E (ed.). **Manejo da salinidade na**



**agricultura: estudos básicos e aplicados**. 2.ed. Fortaleza: INCT Sal, 2016. Cap.2, p.9-16.

SOARES FILHO, W. S.; GHEYI, H. R.; BRITO, M. E. B.; NOBRE, R. G.; FERNANDES, P. D.; MIRANDA, R. S. Melhoramento genético e seleção de cultivares tolerantes à salinidade. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. DA S.; LACERDA, C. F. DE; GOMES FILHO, E (ed.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 2. ed. Fortaleza: INCTSal, 2016. Cap.17, p.259-274.

SOLOGUREN, L. Demanda mundial cresce e Brasil tem espaço para expandir produção. **Revista Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 13, p. 8-11, 2015.

PESSARAKALI, M.; SZABOLCS, I. Soil salinity and sodicity as particular plant/crop stress factors. *In*: PESSARAKALI, M (ed.). **Handbook of plant and crop stress**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1999. p.1-15.

## 2 CRESCIMENTO, RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E PRODUÇÃO DO MILHO IRRIGADO COM ÁGUAS DE DIFERENTES SALINIDADES E SOB FRAÇÕES DE LIXIVIAÇÃO DETERMINADAS POR DOIS MÉTODOS

### RESUMO

O milho é uma cultura moderadamente sensível a salinidade. Deste modo, a planta pode apresentar grandes alterações de crescimento e produção em função do método de manejo da salinidade adotado. A fração de lixiviação (FL) é uma técnica que visa reduzir a presença de sais na zona radicular da planta. Porém, a depender do método de determinação dessa FL, o vegetal pode apresentar resultados distintos. O presente capítulo testou a hipótese que o método de cálculo da FL altera a resposta do milho à salinidade. Desta forma, objetivou-se avaliar os efeitos da FL determinada por dois métodos sobre o crescimento, respostas fisiológicas e produção do milho (BRS 2020) submetido a diferentes salinidades da água de irrigação. O experimento foi instalado na área da Estação Meteorológica da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, em delineamento inteiramente casualizado, composto por 4 níveis de salinidade da água de irrigação –  $CE_a$  (0,5, 2,0, 4,0 e 6,0  $dS\ m^{-1}$ ), 2 formas de cálculo da FL e 7 repetições. As parcelas experimentais foram compostas por uma coluna de solo cultivada com milho. As FL foram determinadas por dois métodos: AS - Aplicação das FL calculada para cada nível de salinidade, de acordo com a fórmula proposta por Rhoades; BS - Aplicação da FL de 15% calculada a partir do balanço hídrico do solo das parcelas experimentais. Foram avaliadas: altura da planta, área foliar, matéria seca da parte aérea, do limbo e do colmo, trocas gasosas, índice de clorofila e produção. Para todas as variáveis de crescimento e produção não houve diferença estatística significativa ( $p < 0,05$ ) entre os métodos de determinação da FL. Os métodos de determinação da fração de lixiviação propostos por Rhoades e do balanço hídrico + 15% de FL não resultaram em diferentes respostas das plantas de milho à salinidade, considerando-se o crescimento e produção. Porém, a condutância estomática foi maior nos tratamentos em que a FL foi calculada a partir do método proposto por Rhoades.

**Palavras-chave:** *Zea mays*. Estresse salino. Coluna de solo. Lixiviação. Trocas gasosas foliares.

## **GROWTH, PHYSIOLOGICAL RESPONSES AND YIELD OF MAIZE IRRIGATED WITH WATERS OF DIFFERENT SALINITIES AND SUBMITTED TO LEACHING FRACTIONS DETERMINED BY TWO METHODS**

### **ABSTRACT**

Maize is a moderately sensitive crop to salinity. Thus, the plant can show major changes in growth and yield depending on the method of management of salinity adopted. The leaching fraction (LF) is a technique that aims to reduce the presence of salts in the root zone of the plant. However, depending on the method of determining this LF, the plant may present different results. This chapter tested the hypothesis that the LF calculation method alters the maize response to salinity. Thus, it was aimed to assess the effects of LF determined by two methods on growth and physiological responses yield of the maize (BRS 2020) under different salinity irrigation water. The experiment was installed in the area of the Meteorological Station of the Federal University of Ceara, Pici campus, Fortaleza - CE, in a completely randomized design, composed of 4 salinity levels of irrigation water -  $EC_w$  (0.5, 2.0 4.0 and 6.0  $dS\ m^{-1}$ ), 2 methods of determining the LF and 7 replications. The experimental plots were composed of a soil column grown with maize. The LF were determined by two methods: AS - Application of LF calculated for each level of salinity, according to the formula proposed by Rhoades; BS - Application of 15% LF calculated from the soil water balance of the experimental plots. Plant height, leaf area, shoot dry matter, leaves and stem, gas exchange, chlorophyll index and yield were evaluated. For all growth and yield variables, there was no statistically significant difference ( $p < 0.05$ ) between the methods of determining LF. The methods for determining the leaching fraction proposed by Rhoades and the water balance + 15% LF did not result in different responses of maize plants to salinity, considering the growth and yield. However, stomatal conductance was higher in treatments in which LF was calculated using the method proposed by Rhoades.

**Keywords:** *Zea mays*. Salt stress. Soil column. Leaching. Leaf gas Exchange.

## INTRODUÇÃO

O Brasil sempre se destacou no cenário mundial na produção agrícola, em especial, na produção de grãos. Ao longo da última década, a produção agrícola vem crescendo a cada safra. A produção de grãos, por exemplo na safra 2018/2019, teve um crescimento de 6,4% em relação à safra de 2017/2018, atingindo um total de 242,1 milhões de toneladas. O aumento da produção agrícola brasileira deve-se principalmente as culturas de algodão e de milho (CONAB, 2019).

O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas mais importantes para o homem, seja do ponto de vista econômico, como do ponto de vista social. A utilização do milho é ampla, abrangendo seu emprego como alimento, assim como para uso industrial e energético (SOLOGUREN, 2015). No Brasil, a área total destinada a produção de milho na safra de 2018/2019 foi entorno de 17,5 milhões de hectares e a produção (primeira e segunda safra) foi de aproximadamente 100 milhões de toneladas do grão (CONAB, 2019).

As regiões Centro-oeste, Sudeste e Sul do Brasil apresentam as principais áreas de cultivo do milho (BARROS e ALVES 2015; IBGE, 2017). Apesar das grandes extensões de áreas agrícolas destinado a cultura, a produtividade brasileira ainda é considerada baixa. Enquanto a produtividade nacional é de 4,28 tonelada de grãos ha<sup>-1</sup>, na América Latina é de 4,99 t ha<sup>-1</sup> e a média mundial é de 5,64 t ha<sup>-1</sup> (FAOSTAT, 2016).

No Nordeste, a cultura do milho figura-se como uma das mais importantes. Entretanto, a escassez de água é um dos entraves para uma produção satisfatória da cultura na região. Associado a esse problema, o uso de água salina na irrigação diminui a produtividade das plantas glicófitas (MUNNS e TESTER, 2008; SOARES FILHO *et al.*, 2016; LACERDA *et al.*, 2016; BRAZ *et al.*, 2019). De acordo com Ayers e Westcot (1985), o milho é uma cultura moderadamente sensível a salinidade. A salinidade limiar da cultura para água de irrigação e para o solo (extrato de saturação) é, respectivamente, 1,7 e 1,1 dS m<sup>-1</sup>, sendo que, a prática da irrigação com água com salinidade superior a 3,9 dS m<sup>-1</sup> pode provocar perdas em mais de 50% do rendimento potencial da cultura.

A salinidade da água e do solo são fatores abióticos que reduzem a produtividade das culturas. A inibição do crescimento vegetal devido ao estresse salino pode ser causada pela redução do potencial osmótico da solução do solo e/ou

acumulação excessiva de íons nos tecidos vegetais (especialmente o sódio e cloro), o que pode induzir a toxicidade iônica, o desequilíbrio nutricional ou a ambos (AZEVEDO NETO e TABOSA, 2000; GARCIA, *et al.*, 2007; MUNNS e TESTER, 2008; LACERDA *et al.*, 2016; SOARES FILHO *et al.*, 2016).

Os efeitos da salinidade nas plantas (osmóticos, tóxicos e nutricionais) afetam a assimilação líquida de CO<sub>2</sub>, inibem a expansão foliar e aceleram a senescência de folhas maduras, reduzindo, conseqüentemente, a área destinada ao processo fotossintético e a produção total de fotoassimilados (LACERDA *et al.*, 2003; MUNNS e TESTER, 2008; FAROOQ, *et al.*, 2015; BRAZ *et al.*, 2019).

Diante dos impactos que a salinidade provoca na produção vegetal, inúmeras técnicas são propostas no intuito de mitigar os efeitos negativos provocados pela elevada concentração de sais na água e/ou no solo. Dentre elas podemos citar principalmente o uso de variedades de plantas resistentes ou melhoradas geneticamente (SOARES FILHO *et al.*, 2016), aplicação de condicionantes ao solo (em especial a matéria orgânica), prática de gessagem (TROEH e THOMPSON, 2007) e a aplicação de frações de lixiviação (AYERS e WESTCOT, 1985; BERNARDO *et al.*, 2019).

A fração de lixiviação é, sem dúvidas, a prática mais adotada dentre as técnicas para se produzir utilizando-se água com elevadas concentrações de sais. Entretanto, o uso irracional dessa fração de lixiviação pode promover o desperdício de água sem, necessariamente, diminuir os efeitos negativos provocado pela salinidade ao vegetal (FAROOQ, *et al.*, 2015; LACERDA *et al.*, 2016). Deste modo, é frequente a ocorrência de grandes perdas econômicas e ambientais devido à baixa eficiência do uso da água.

Diante do exposto, no presente capítulo testou-se a hipótese de que o método de cálculo da fração de lixiviação altera a resposta do milho à salinidade. Desta forma, objetivou-se avaliar os efeitos da fração de lixiviação determinada por dois métodos no crescimento, respostas fisiológicas e produção do milho submetido a diferentes salinidades.

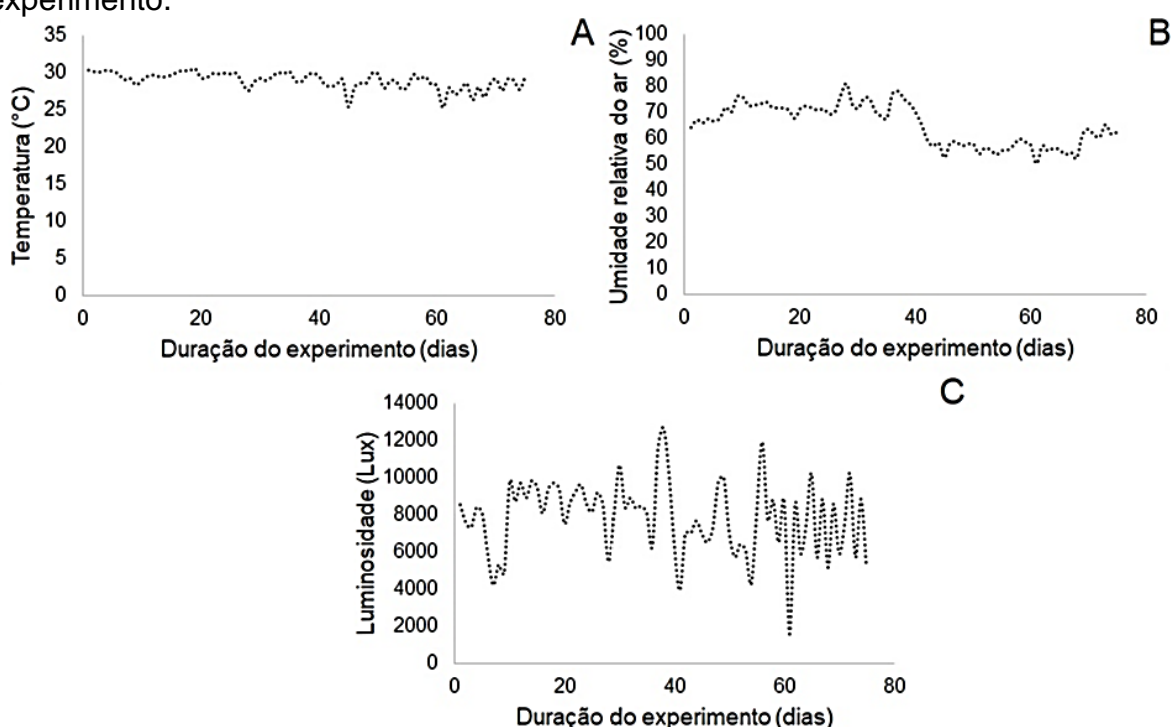
## MATERIAL E MÉTODOS

### Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi instalado e conduzido no período de novembro de 2017 a fevereiro de 2018 em casa de vegetação na área da estação meteorológica da Universidade Federal do Ceará – UFC, *campus* do Pici, Fortaleza – Ceará. As coordenadas geográficas do local são 3° 45' S e 38° 33' W e altitude de 19 m. De acordo com a classificação de Köppen, a área do experimento está inserida em uma região de clima Aw', ou seja, tropical chuvoso, muito quente, com predomínio de chuvas nas estações do outono e do verão.

O ambiente interno da casa de vegetação foi monitorado diariamente por meio de um *Data Logger* (modelo HOBO® U12-012 Temp/RH/Light/Ext) localizado no centro da área experimental. Ao final do experimento, os dados de temperatura, umidade relativa do ar e luminosidade foram extraídos e tabulados, conforme representado na Figura 1.

Figura 1 – Valores médios diários referentes à temperatura (A), umidade relativa do ar (B) e luminosidade (C) no interior da casa de vegetação durante a condução do experimento.



Fonte: elaborado pelo autor

As temperaturas médias diárias ao longo do experimento no interior da casa de vegetação foram praticamente constantes (29 °C) e com a amplitude térmica entorno de 5 °C (FIGURA 1A). A média da umidade relativa do ar nos primeiros 40 dias de experimento foi de 71,6% baixando a partir desse período até o final do experimento para 57,8% (FIGURA 1B).

Para os dados de luminosidade no interior da casa de vegetação foi considerado a média obtida do horário de 6:00 a 18:00 horas de cada dia. Ao longo da condução do experimento, os valores de luminosidade apresentaram grandes variações, principalmente devido a presença de nuvens e eventos de precipitação que ocorreram em alguns dias durante o período de dezembro de 2017 a fevereiro de 2018 (FIGURA 1C). O fotoperíodo foi de aproximadamente 12 horas.

### **Delineamento experimental e tratamentos**

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), com arranjo dos tratamentos em parcelas subdivididas. A composição dos tratamentos foi resultante da combinação da aplicação de duas formas de determinar a fração de lixiviação e o uso da água de irrigação com quatro níveis de salinidade –  $CE_a$  (0,5, 2,0 4,0 e 6,0  $dS\ m^{-1}$ ) e sete repetições. Para variáveis medidas durante o experimento (altura da planta) se considerou o tempo como subsubparcela.

As frações de lixiviação (FL) foram definidas da seguinte forma: AS - Aplicação das frações de lixiviação calculada para cada nível de salinidade, de acordo com a fórmula proposta por Rhoades (1974); BS - Aplicação de frações de lixiviação de 15% calculada a partir do balanço hídrico do solo das parcelas experimentais. A composição dos tratamentos pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 – Resumo da composição dos tratamentos do experimento

Método para aplicação da FL*	CE <sub>a</sub> (dS m <sup>-1</sup> )	FL para os níveis salinos da água (%)	Tratamentos
A. $FL = \frac{CE_a}{5CE_{es} - CE_a}$	S1 = 0,5	5	AS1
	S2 = 2,0	19	AS2
	S3 = 4,0	47	AS3
	S4 = 6,0	92	AS4
B. Balanço hídrico do solo	S1 = 0,5	15	BS1
	S2 = 2,0	15	BS2
	S3 = 4,0	15	BS3
	S4 = 6,0	15	BS4

\*Fórmula A: CE<sub>a</sub> – Salinidade da água de irrigação (dS m<sup>-1</sup>); CE<sub>es</sub> – Salinidade do extrato de saturação do solo que representa a salinidade tolerável para cultura (para o milho, CE<sub>es</sub> = 2,5 dS m<sup>-1</sup>). Fórmula B: Balanço hídrico = lâmina aplicada – lâmina drenada, em mm.

Para o preparo dos tratamentos salinos foram adicionados à água de poço, cloreto de sódio (NaCl), cloreto de cálcio (CaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O) e cloreto de magnésio (MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O), na proporção equivalente a 7:2:1, obedecendo-se a relação entre CE<sub>a</sub> e sua concentração (mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> = CE x 10), conforme Rhoades, Kandiah e Marshali (2000). Antes de cada irrigação a condutividade elétrica da água de cada tratamento era verificada por meio de condutivímetro digital portátil.

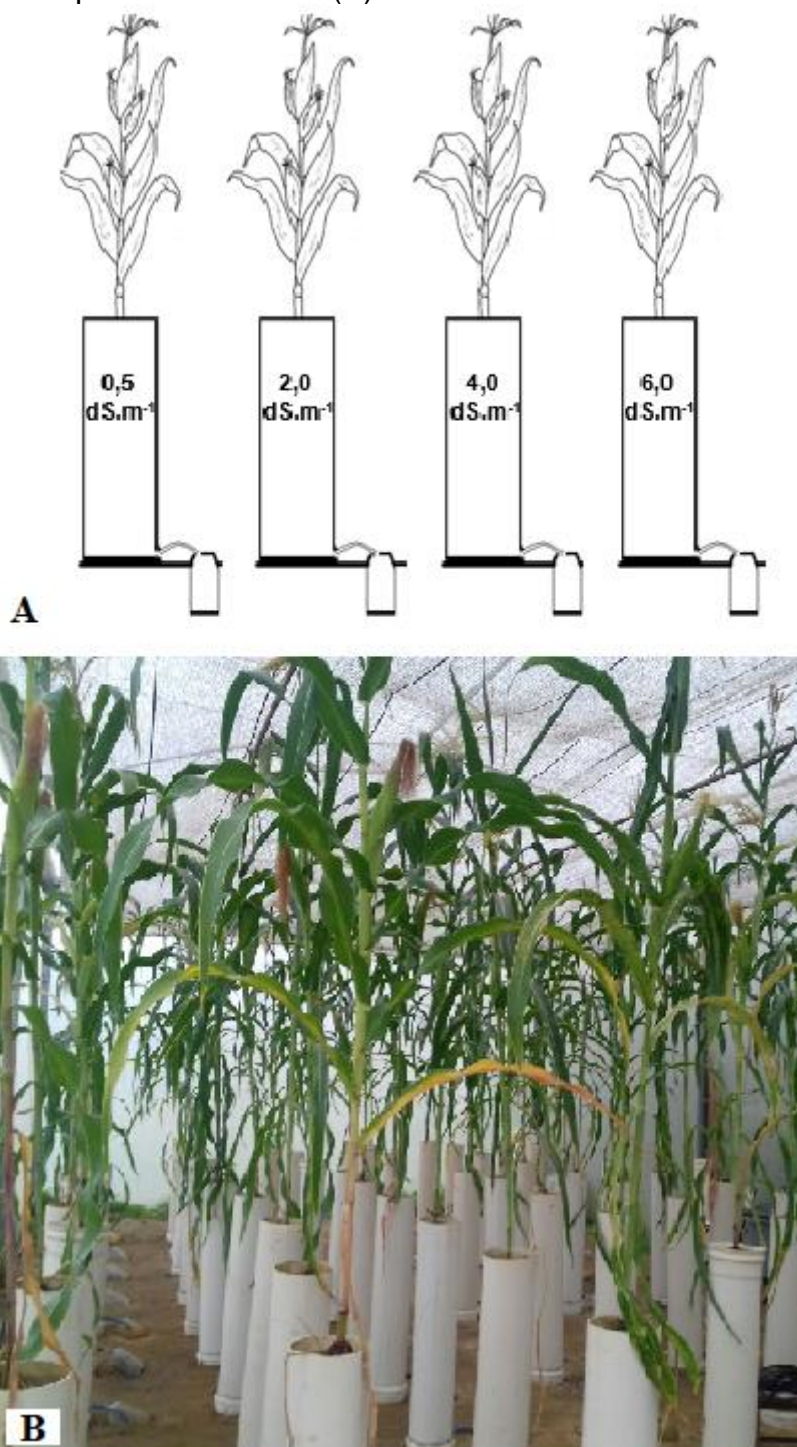
### Coleta do solo e montagem das colunas

As parcelas experimentais foram compostas por uma coluna de solo cultivada com milho. Para a confecção das colunas de solo, utilizou-se tubos de PVC rígido com diâmetro interno de 20 cm e comprimento de 100 cm (FIGURA 2). As extremidades inferiores foram fechadas e vedadas com tampas de PVC (caps). A parede interna dos tubos recebeu uma camada de cola com areia para impedir o fluxo preferencial de água entre o solo e a parede do tubo. A extremidade basal da coluna foi preenchida com areia grossa até a altura de 5 cm para facilitar a drenagem.



Para permitir a drenagem e coleta do lixiviado, as tampas foram perfuradas e acopladas a mangueiras. As mangueiras foram conectadas a frascos plásticos de 1000 mL posicionados na base das colunas abaixo do nível do solo.

Figura 2 – Representação esquemática das colunas de solo (A); Imagem das colunas com as plantas de milho aos 65 dias após a semeadura (B)



Fonte: elaborado pelo autor.

A coleta do solo usado no preenchimento das colunas foi realizada por meio de abertura de trincheira na área experimental pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará - UFC, *campus* do Pici, Fortaleza – Ceará. O solo da área foi classificado como ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico Típico.

As delimitações dos horizontes foram feitas de acordo com a descrição morfológica do perfil, conforme Santos *et al.* (2015). A partir das marcações estabelecidas com base na espessura dos horizontes, procedeu-se as coletas das amostras de solo no intuito de simular, nas colunas, a mesma sequência dos horizontes encontrados “*in situ*”. Deste modo, amostras de cada horizonte do solo foram retiradas e peneiradas (em peneiras de malha de 2 mm) separadamente, para posterior montagem das colunas.

As colunas foram montadas obedecendo a mesma sequência dos horizontes dos solos. Porém, devido ao fato da espessura dos horizontes exceder o comprimento da coluna, foram definidas três camadas dentro do comprimento de 1 m de profundidade. Deste modo, realizou-se as seguintes divisões: primeira camada, material recolhido do horizonte A (0-20 cm); segunda, material recolhido nos horizontes E e EB (21-60 cm); terceira, material recolhido no horizonte B textural (61-90 cm).

Após a coleta do solo, amostras de cada horizonte foram utilizadas para caracterização dos atributos físicos e químicos de acordo com os métodos propostos por Embrapa (2017). As duas primeiras camadas do solo apresentaram textura classificada como areia franca. A terceira camada, mais argilosa, foi classificada como franco argiloarenosa. A CE média das camadas foi de  $0,11 \text{ dS m}^{-1}$  ( $\pm 0,1 \text{ dS m}^{-1}$ ) e o pH encontrou-se na faixa de neutralidade, variando entre 6,3 a 5,7. Para o percentual de saturação por sódio (PSS), foram constatados os seguintes valores: 4,42 (0-20 cm), 6,96 (21-60 cm) e 4,21% (61-90 cm).

### **Semeadura e condução do experimento**

A cultura utilizada no experimento foi o milho (*Zea mays* L.) híbrido BRS 2020, que possui como características o ciclo precoce, porte baixo, apresentando

altura média de plantas de 2,15 m. De acordo com Ayers e Westcot (1985), o milho é uma espécie considerada moderadamente sensível à salinidade.

Cada coluna de solo recebeu quatro sementes de milho e, sete dias após a semeadura, procedeu-se o desbaste deixando-se apenas uma planta por coluna. No dia seguinte ao desbaste, iniciou-se a aplicação da água salina de acordo com cada tratamento (TABELA 1).

A adubação das plantas foi realizada de acordo com a recomendação da Embrapa (2006) para a cultura do milho. A adição do nitrogênio e do potássio foi parcelada, sendo 15% durante a semeadura, 25% fornecido 20 dias após a semeadura (DAS), 30% aos 35 DAS e os 30% restantes aos 50 DAS. O fósforo foi aplicado em única adubação, em fundação. Cada coluna recebeu 5,8 g de ureia, 8,3 g de superfosfato simples e 2 g de cloreto de potássio, respectivamente equivalentes a 200 kg de N ha<sup>-1</sup>, 120 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> e 90 kg de K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>.

Para determinar a necessidade hídrica da cultura, uma parcela de cada tratamento foi utilizada como lisímetro de drenagem. A irrigação do experimento era realizada com o auxílio de provetas a cada dois dias até os 30 DAS. Após esse período, as irrigações tornaram-se diárias até o encerramento do experimento. As aplicações das frações de lixiviação ocorriam a cada irrigação de acordo com cada tratamento. Para tal, levava-se em consideração o volume de água aplicada e o volume de água drenada do dia anterior de cada parcela.

## **Variáveis analisadas**

### ***Crescimento e produção do milho***

Aos 22, 42 e 72 dias após a semeadura (DAS) foram realizadas avaliações da altura das plantas com auxílio de uma fita métrica graduada em centímetros. A medição dessa variável foi feita da base do caule (ao nível do solo) até o ápice da planta.

Ao final do experimento (80 DAS), procedeu-se a medição da área foliar, utilizando para tal, um integrador de área (Area meter, LI-3100, Li-Cor, Inc. Lincoln, NE, USA). Nesse mesmo período, realizou-se a determinação da matéria seca da parte aérea, colmos + bainhas, limbos foliares e espigas. Para essas análises, todo o

material foi particionado e colocado em sacos de papel devidamente identificados e, posteriormente, alocado em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C para secagem até a massa constante. Por fim, o material foi pesado em balança analítica de precisão.

O peso seco das espigas foi determinado com e sem a palhada. O comprimento e diâmetro da espiga foram obtidos após a remoção da palhada, respectivamente, com auxílio da trena métrica e de um paquímetro digital com resolução de 0,1 mm.

### ***Trocas gasosas e índice de clorofila***

As trocas gasosas foliares foram realizadas aos 70 DAS, utilizando-se a terceira folha completamente expandida, a partir do ápice da planta. A assimilação líquida de CO<sub>2</sub> (A), condutância estomática (gs), concentração interna de CO<sub>2</sub> (Ci) e transpiração (E), foram determinadas por meio do medidor portátil de fotossíntese (modelo LI6400XR, Licor, USA), sob luz saturante, concentração constante de CO<sub>2</sub> (400 ppm) e temperatura ambiente.

O índice de clorofila foi mensurado com o auxílio de um clorofilômetro portátil (SPAD 502, Minolta Co, Ltd, Osaka, Japan), também aos 70 DAS. As leituras ocorreram nas segundas e terceiras folhas de cada planta. Realizou-se 4 leituras por folha, totalizando 8 leituras por planta, sendo o valor médio expresso como índice relativo de clorofila (IRC).

### **3.5 Análise estatística**

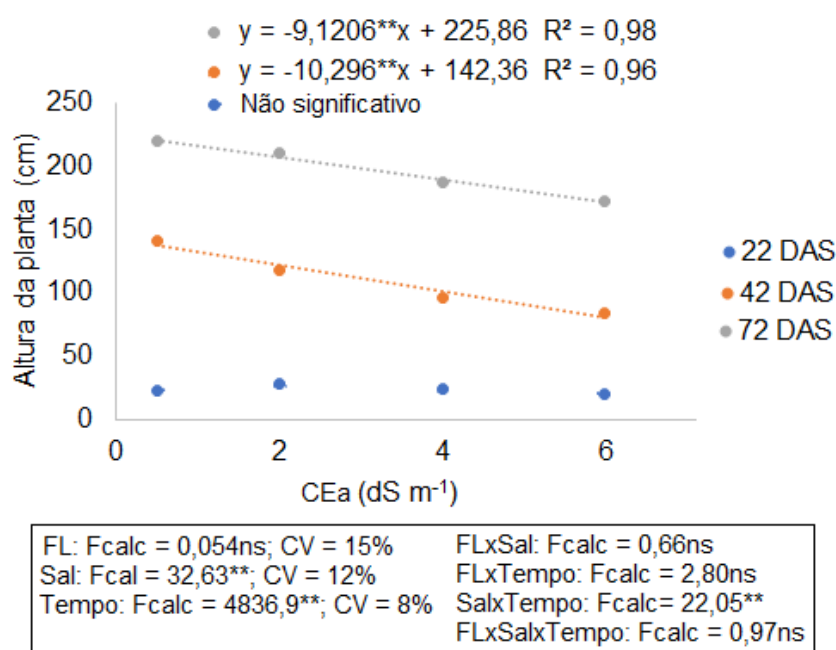
Os resultados obtidos para os dados avaliados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e para o teste de comparação de médias, aplicou-se Tukey (comparação das frações de lixiviação). Para as respostas aos níveis de salinidade utilizou-se a análise de regressão. A análise estatística foi realizada com auxílio do software SISVAR versão 5.6, considerando o nível de confiança de 95% (FERREIRA, 2011).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Crescimento vegetativo e produção do milho

Para a variável altura, não houve diferença estatística significativa ( $p < 0,05$ ) entre os métodos de determinação da FL. Entretanto, para a salinidade da água, tempo e interação salinidade x tempo, observou-se uma diferença estatística a nível de 1% de significância. Na primeira medição da altura das plantas (aos 22 DAS), não houve diferença significativa entre os tratamentos salinos, conforme a Figura 3.

Figura 3 – Curvas de regressão para três períodos de medição da altura das plantas de milho submetido a diferentes métodos de determinação da FL e diferentes CE da água de irrigação.



\*\* e ns - significativo a 1%, e não-significativo pelo Teste F, respectivamente.

A altura média do milho para esse período foi de 23,50 cm. Porém, é importante salientar que a aplicação dos tratamentos salinos nas plantas iniciou-se somente 8 dias após a semeadura. Desta forma, infere-se que as plantas podiam ser capazes de suportar a quantidade de sais depositada no solo que, naquele período, ainda era baixa. Alguns estudos mostram que o milho é mais sensível a salinidade na fase inicial de desenvolvimento (GOMES *et al.*, 2011; TAIZ *et al.*, 2017), de modo que

a aplicação após o estabelecimento da plântula reduz sensivelmente os efeitos da salinidade na formação do estande.

A partir de 42 DAS verificou-se os efeitos do estresse salino na altura das plantas. O aumento da concentração de sais na água de irrigação ( $CE_a$ ) foi inversamente proporcional à altura das plantas. Em média, as plantas que receberam água de baixa salinidade ( $CE = 0,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) foram 56 cm mais altas que aquelas irrigadas com água de  $CE$  de  $6 \text{ dS m}^{-1}$ .

Na terceira medição da altura, assim como na segunda, o modelo de resposta foi na forma de regressão linear inversamente proporcional ao aumento da  $CE_a$  ( $R^2 \geq 96\%$ ). Observou-se que para esses períodos de medição, a inclinação da reta foi praticamente igual, apresentando coeficientes angulares de -9,12 e -10,29, respectivamente para 42 e 72 DAS (FIGURA 3). Em estudo sobre os efeitos das interações de doses de nitrogênio e salinidade em milho cultivado em dois tipos de solo, Braz *et al.* (2019), constataram uma queda mais acentuada a partir de um  $CE_a$  de  $2 \text{ dS m}^{-1}$ , independente do tipo de solo onde a planta foi cultivada.

Assim como na altura, as demais variáveis de crescimento vegetal não foram influenciadas pelo método de determinação da FL. Em todos os casos, a salinidade da água foi o fator que influenciou nas médias de crescimento e produção do milho, como pode-se observar na Tabela 2.

Tabela 2 – Resumo da análise de variância com os valores  $F_{\text{calculado}}$  para a matéria seca da parte aérea, matéria seca do limbo, área foliar, matéria seca do colmo, matéria seca com e sem palhada da espiga, diâmetro e comprimento da espiga

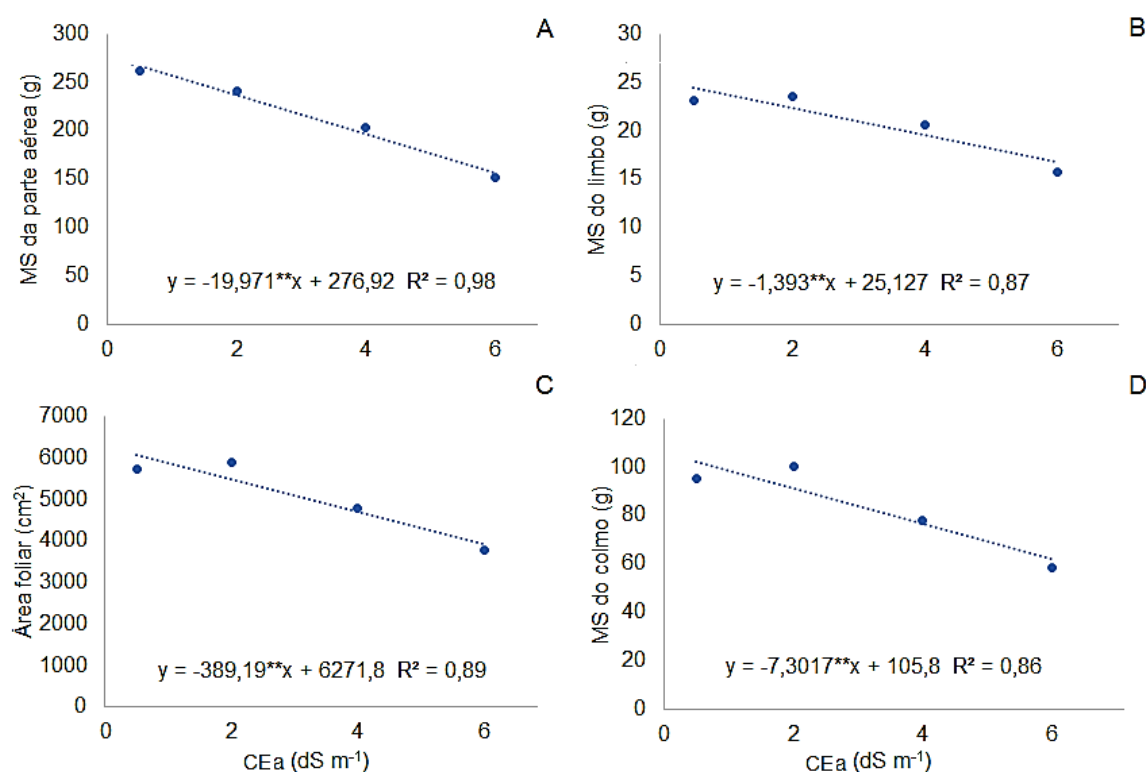
FV	F calculado							
	MS parte aérea	MS limbo	Área foliar	MS colmo	MS Espiga c/palha	MS Espiga s/palha	Ø Espiga	L Espiga
FL (A)	0,82ns	1,02ns	0,25ns	0,01ns	0,34ns	0,71ns	0,12ns	0,45ns
Sal. (B)	13,76**	7,52**	26,36**	19,36**	9,37**	7,99**	7,13**	8,01**
AxB	0,67ns	0,81ns	0,61ns	4,98ns	0,88ns	0,87ns	0,02ns	1,30ns
CV <sub>1</sub> (%)	21,05	13,21	17,92	26,61	21,55	34,22	9,67	15,43
CV <sub>2</sub> (%)	20,98	16,23	13,16	20,44	28,3	37,81	15,8	14,7
	----- g -----		cm <sup>2</sup>	----- g -----			mm	cm
Média AS	208,59	20,37	4990,63	85,26	95,87	50,72	33,2	12,63
Média BS	220,43	21,17	5120,54	85,70	99,40	55,12	33,6	13,01

FV – Fonte de variação, MS – Matéria seca, Ø – Diâmetro, L – comprimento, FL – Fração de lixiviação, Sal. – Salinidade da água, CV – coeficiente de variação, <sup>ns</sup> e <sup>\*\*</sup> Não significativo e significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F, respectivamente. AS: fração de lixiviação calculada de acordo com fórmula proposta por Rhoades; BS: fração de lixiviação determinado a partir do balanço hídrico + 15% de FL.

As curvas de regressão para a matéria seca da parte aérea e a área foliar decresceram de forma linear ao passo que ocorreu o acréscimo de sais na água de irrigação (FIGURA 4), resultado similar ao padrão verificado na altura das plantas. Constatou-se uma queda de 7,21% na MS da parte aérea e 6,21% na área foliar a cada aumento unitário da salinidade a água de irrigação. Além disso, a cada aumento unitário da  $CE_a$ , resultou numa diminuição de 5,54% e 6,90%, respectivamente na matéria seca do limbo e matéria seca do colmo.

É importante salientar que o método proposto por Rhoades (AS), no qual a FL aumenta conforme aumenta-se a salinidade da água (chegando até um FL de até 92%), não houve diferença estatística ( $p < 0,05$ ) daqueles tratamentos em que a FL foi determinada pelo balanço hídrico + 15% de FL (BS). Ou seja, os dois métodos utilizados para se determinar a FL foram incapazes de mitigar os efeitos deletérios da salinidade no crescimento do milho.

Figura 4 – Curvas de regressão para matéria seca da parte aérea (A), matéria seca do limbo (B), área foliar (C) e matéria seca do colmo de plantas de milho submetido a diferentes métodos de determinação da FL e diferentes CE da água de irrigação



\*\* significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F.

A folha é o principal órgão responsável pela fotossíntese e trocas gasosas dos vegetais (TAIZ *et al.*, 2017; BHATLA e LAL, 2018). O estresse salino provoca a inibição da expansão foliar e acelera a senescência das folhas maduras, reduzindo conseqüentemente, a área destinada ao processo fotossintético (LACERDA *et al.*, 2003; MUNNS e TESTER, 2008), conforme constatou-se nas Figuras 4B e 4C. Esse fato tem relação direta com a menor produção total de fotoassimilados, refletindo assim, em plantas menores (FIGURA 3) e com colmo (FIGURA 4D) e parte aérea pouco desenvolvidas (FIGURA 4A).

Inúmeros trabalhos documentam os efeitos deletérios que a irrigação com água salina provoca no milho. Nazário *et al.* (2013) verificaram que a cultivar de milho PL6880 sofreu redução da massa seca da parte aérea, das raízes e área foliar das plantas submetidas a irrigação com água salina. Gomes *et al.* (2011), analisaram o crescimento do milho AG 1051 submetido ao estresse salino e cultivado em diferentes espaçamentos. Os autores concluíram que independente do espaçamento adotado, a irrigação com água salina (5 dS m<sup>-1</sup>) diminui a altura, a área foliar e massa seca da parte aérea das plantas.

Feijão *et al.* (2013) em experimento com doses de N em ambiente salino e não-salino para a cultura do milho, verificaram que para qualquer dose de N utilizada, as médias de área foliar, matéria seca da parte aérea e raiz foram menores nas plantas cultivadas no ambiente salino. Braz *et al.* (2019) e Ribeiro *et al.* (2020) também estudando os efeitos de doses de N em milho irrigado com água de diferentes salinidades mostraram que as plantas perderam mais biomassa da parte aérea à medida que foram submetidas a irrigações com água mais salina. Esses efeitos deletérios também podem ser constatados na capacidade produtiva das plantas.

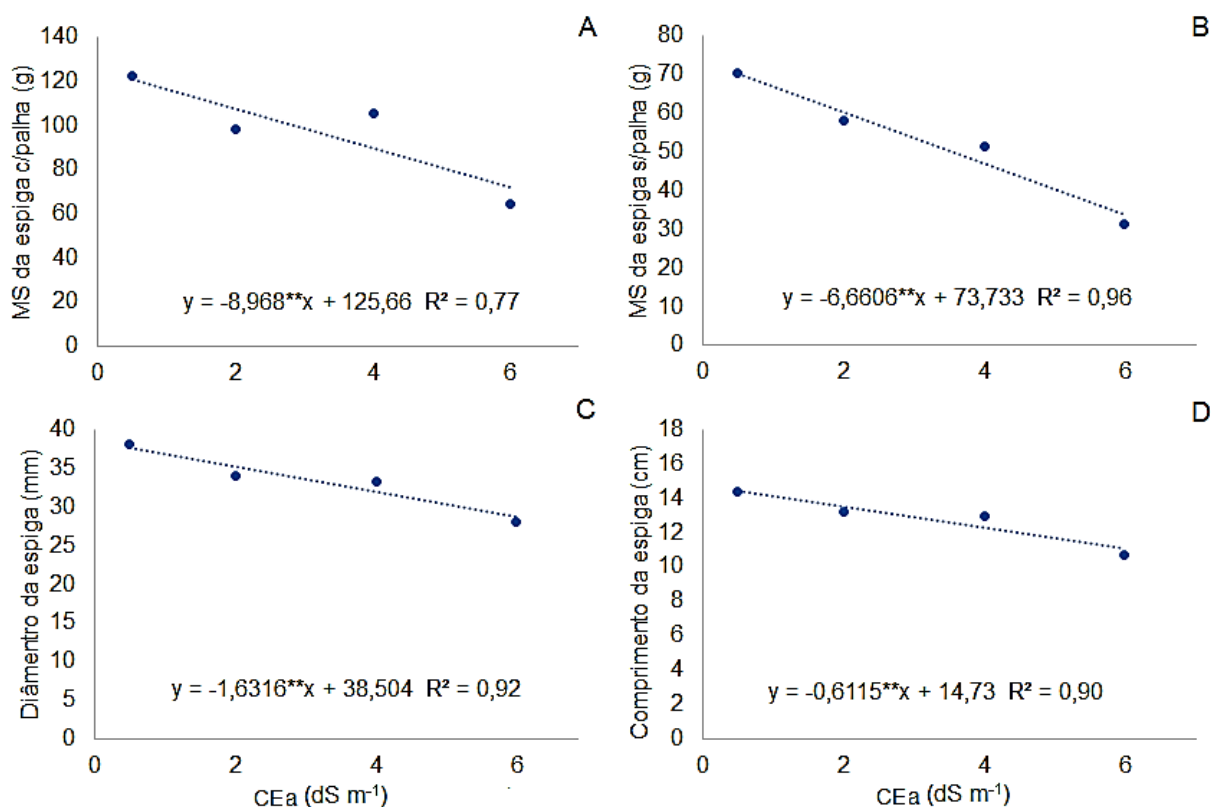
Os dados de produção vegetal, especialmente aqueles relacionados às espigas, tendem a ser os mais observados pelos produtores na escolha do método de manejo da cultura do milho. Para as variáveis matéria seca da espiga com e sem palha, diâmetro e comprimento da espiga, verificou-se diferença estatística ( $p < 0,01$ ) apenas para a salinidade da água de irrigação (TABELA 2 e FIGURA 5).

As médias de massa seca da espiga (com ou sem palha) mostraram-se mais sensíveis as variações da CE<sub>a</sub> do que o diâmetro e comprimento da espiga (FIGURA 5). Em média, as plantas irrigadas com água de 0,5 dS m<sup>-1</sup> apresentaram espigas despalhadas com massa de 70,5 g enquanto as irrigadas com água mais salina (6 dS m<sup>-1</sup>), pesavam apenas 31,5 g. Ou seja, uma diferença de 55%. Quanto



ao diâmetro da espiga, as maiores médias foram verificadas nas plantas irrigadas com água de  $0,5 \text{ dS m}^{-1}$  (38 mm), diferindo em apenas 26% das plantas irrigadas com a água mais salina (28 mm). Em relação ao comprimento das espigas, mesmo diferindo estatisticamente ( $p < 0,01$ ), as maiores espigas (14 cm para  $\text{CE}_a$  de  $0,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) foram apenas 24% superior às menores espigas (10,7 cm para a  $\text{CE}_a$  de  $6 \text{ dS m}^{-1}$ ).

Figura 5 – Curvas de regressão para matéria seca da espiga com palha (A) e sem palha (B), diâmetro (C) e comprimento (D) das espigas de milho submetido a diferentes métodos de determinação da FL e diferentes  $\text{CE}$  da água de irrigação



\*\* significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F.

A literatura sobre o efeito da salinidade na produção do milho é abundante. E, de maneira geral, as curvas resposta obtidos por diversos autores (BLANCO *et al.*, 2008; NAZARIO *et al.*, 2013; FENG *et al.*, 2017) mostraram uma queda progressiva na produtividade da cultura à medida que a planta é irrigada com água de  $\text{CE}$  mais elevada, corroborando assim, com os resultados encontrados no presente experimento.

Além dos fenômenos já mencionados sobre os efeitos negativos no desenvolvimento do vegetal devido as altas concentrações de sais na zona radicular, Garcia *et al.* (2007) apontam que a redução da produção do milho está relacionada

ao desvio de energia promovido pela planta na tentativa de adaptar-se ao ambiente. O custo metabólico de energia é refletido no menor desenvolvimento e produção do vegetal. Em adição, segundo os autores, a salinidade promove desde a redução no potencial hídrico no solo até a injúria celular, causada pelo estresse oxidativo na planta.

### Trocas gasosas e índice de clorofila

As trocas gasosas foliares têm sido amplamente utilizadas para avaliar os efeitos dos fatores de estresse na fisiologia das plantas. No presente estudo tais análises foram realizadas 70 dias após a semeadura. Contudo, apenas a condutância estomática (gs) apresentou diferença estatística significativa a nível de 5% de probabilidade entre os métodos de determinação da FL (TABELA 3).

Tabela 3 – Resumo da análise de variância com os valores de  $F_{\text{calculado}}$  para assimilação líquida de  $\text{CO}_2$  (A), condutância estomática (gs), concentração interna de  $\text{CO}_2$  (Ci), transpiração (E), índice relativo de clorofila (IRC), eficiência intrínseca do uso da água (A/gs), Relação Assimilação líquida de  $\text{CO}_2$ /transpiração (A/E)

FV	F calculado						
	A	gs	Ci	E	IRC	A/gs	A/E
FL (A)	3,59ns	6,38*	0,26ns	3,68ns	0,24ns	0,03ns	0,17ns
Sal. (B)	0,36ns	2,29ns	1,33ns	1,43ns	1,17ns	1,78ns	1,22ns
AxB	2,18ns	1,56ns	1,21ns	2,14ns	0,96ns	1,05ns	0,36ns
CV <sub>1</sub> (%)	20,96	17,02	34,68	24,89	6,65	11,69	9,25
CV <sub>2</sub> (%)	20,10	15,92	36,84	19,36	8,30	12,79	13,37
	$\mu\text{mol CO}_2$ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	$\text{mol m}^2$ $\text{s}^{-1}$	$\mu\text{mol}$ $\text{mol}^{-1}$	$\text{mmol}$ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	SPAD	$\mu\text{mol CO}_2$ $\text{m}^2 \text{s}^{-1} / \text{Mol}$ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	$\mu\text{mol}$ $\text{CO}_2 /$ $\text{mmol H}_2\text{O}$
Média AS	34,89	0,21 a	97,74	5,76	45,38	163,30	6,17
Média BS	31,10	0,19 b	102,83	4,97	44,95	162,43	6,24

FV – Fonte de variação, Sal. – salinidade da água, CV – coeficiente de variação, <sup>ns</sup> e \* não significativo, significativo a 5% de probabilidade pelo Teste F, respectivamente. AS - fração de lixiviação calculada de acordo com fórmula proposta por Rhoades; BS - fração de lixiviação determinado a partir do balanço hídrico + 15% de FL.

Em espécies sensíveis a presença de sais na zona radicular, verifica-se a redução da fotossíntese líquida, condutância estomática, transpiração e índice relativo de clorofila quando estas são submetidas a estresse salino. As reduções dessas

variáveis aumentaram com o incremento da concentração de sais no ambiente (ASSIS JÚNIOR *et al.*, 2007; NAZÁRIO *et al.*, 2013; BRAZ *et al.*, 2019, RIBEIRO *et al.*, 2020).

O milho é uma planta com alta eficiência fotossintética. Desta forma, o vegetal consegue manter a assimilação de CO<sub>2</sub> (A) com uma baixa quantidade de água perdida por transpiração (E). Essa é uma das principais vantagens observadas nas plantas do grupo C4 (TAIZ *et al.*, 2017; BHATLA e LAL, 2018). Os dados obtidos no presente estudo diferem de muito outros que demonstram claramente os efeitos da salinidade sobre as trocas gasosas foliares do milho. Entretanto, resultados semelhantes para assimilação de CO<sub>2</sub>, por exemplo, foram encontrados por Gomes *et al.* (2011) em experimento com milho submetido a estresse salino. É necessário salientar que em diferentes fases fenológicas do milho, a planta é fisiologicamente mais sensível ou menos sensível ao estresse salino (TAIZ *et al.*, 2017; BHATLA e LAL, 2018). Deste modo, para as variáveis A, Ci, E e IRC, um maior número de leituras ao longo do experimento, ampliaria a precisão dos resultados.

A condutância estomática (gs) foi maior ( $p < 0,05$ ) quando a FL foi calculada de acordo com Rhoades. Esse método resulta em maiores volumes de água para as parcelas experimentais irrigadas com águas mais salinas no intuito de remover os sais da zona radicular. Essa maior disponibilidade de água para a planta pode contribuir para a alteração dos mecanismos de defesas contra estresses ambientais como o controle da condutância estomática. De fato, a maior gs costuma ter relação direta com a maior transpiração (TAIZ *et al.*, 2017; BHATLA e LAL, 2018). Porém, apesar da transpiração ter sido 14% maior nos tratamentos onde a FL foi determinada de acordo com Rhoades, está não diferiu estatisticamente do método do balanço hídrico + 15% de FL.

O fechamento parcial dos estômatos é uma estratégia usadas pelos vegetais para evitar a perda de água quando submetidos a ambientes com adversidades abióticas como estresse hídrico e/ou salino (AZEVEDO NETO e TABOSA, 2000; MUNNS e TESTER, 2008; TAIZ *et al.*, 2017). Embora esse fechamento parcial não seja notado no milho com tanta intensidade pela análise da assimilação líquida de CO<sub>2</sub> (A), concentração interna de CO<sub>2</sub> (Ci) e transpiração (E), ele foi constatado na redução da condutância estomática (gs).

A eficiência intrínseca do uso de água (A/gs) e a relação entre a fotossíntese líquida e transpiração (A/E) não diferiram estatisticamente ( $p < 0,05$ ) devido os motivos anteriormente explanados.

Algumas variáveis tais como concentração dos elementos químicos na folha e eficiência do uso da água (EUA), podem ser mais sensíveis as variações da salinidade da água e aos diferentes métodos de se determinar a fração de lixiviação. Esses dados são apresentados e discutidos no capítulo 2.

## CONCLUSÃO

Os métodos de determinação da fração de lixiviação propostos por Rhoades e do balanço hídrico + 15% de FL não resultaram em diferentes respostas para as variáveis de crescimento e produção do milho. Entretanto, a altura da planta, área foliar, a matéria seca da parte aérea, do colmo e do limbo foram severamente afetados pela salinidade. Essas variáveis apresentaram médias decrescente com o aumento da concentração de sais na água de irrigação.

Tanto a matéria seca da espiga com palha quanto sem palha, bem como o comprimento e diâmetro das espigas apresentaram queda nos valores com o incremento da salinidade da água. Sendo que as duas primeiras variáveis de produção se mostraram mais sensíveis à salinidade.

A condutância estomática foi a única variável que respondeu aos diferentes métodos de determinação da FL. A condutância estomática foi maior nos tratamentos em que a FL foi calculada a partir do método proposto por Rhoades. As demais variáveis fisiológicas (fotossíntese líquida, concentração interna de CO<sub>2</sub>, transpiração e índice de clorofila) não diferiram em função dos métodos de determinação da FL e nem pelas diferentes salinidades da água de irrigação.

## REFERÊNCIAS

- ASSIS JÚNIOR, J. O.; LACERDA, C. F.; SILVA, F. B.; SILVA, F. L. B.; BEZERRA, M. A.; GHEYI, H. R. Produtividade do feijão-de-corda e acúmulo de sais no solo em função da fração de lixiviação e da salinidade da água de irrigação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 3, p. 702-713, 2007.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **Water quality for agriculture**. FAO Irrigation and Drainage Paper 29. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985. 174 p.
- AZEVEDO NETO, A. D.; TABOSA, J. N. Estresse salino em plântulas de milho: parte II. Distribuição dos macronutrientes catiônicos e suas relações com sódio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, p.165-171, 2000.
- BARROS, G. S. C.; ALVES, L. R. A. Maior eficiência econômica e técnica depende do suporte das políticas públicas. **Revista Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 13, p. 4-7, 2015.
- BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D.; SOARES, A. A. **Manual de irrigação**. 9. ed. Viçosa: Editora UFV, 2019, 545 p. il.
- BHATLA, S. C.; LAL, M. A. **Plant physiology, development and metabolism**. Singapore: Springer Nature Singapore Pte. Ltd, 2018, 1271 p.
- BLANCO, F. F.; FOLEGATTI, M.V.; GHEYI, H. R.; FERNANDES, P.D. Growth and yield of corn irrigated with saline water. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.65, n.6, p. 574-580, 2008.
- BRAZ, R. S.; LACERDA, C. F.; ASSIS JUNIOR, R. N.; FERREIRA, J. F. S.; OLIVEIRA, A. C.; RIBEIRO, A. A. Growth and physiology of maize under water salinity and nitrogen fertilization in two soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.23, n.12, p. 907-913, 2019.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos – safra 2018/19**. v. 6 - Safra 2018/19 - Décimo segundo levantamento, Brasília, v. 6, 2019. 126 p.
- EMBRAPA. **Manual de análises de solo**. 3. ed. revisado e ampliado – Brasília, DF, 2017, 574 p.
- EMBRAPA. **Nutrição e adubação do milho**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica 78, 2006. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/490410>. Acesso em: 22 nov. 2017.
- FAO, 2016. **FAOSTAT**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 19 mar. 2018.

FAROOQ, M.; HUSSAIN, M.; WAKEEL, A.; SIDDIQUE, K. H. M. Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, [s. l.], v. 35, p. 461–481, 2015.

FEIJÃO, A. R.; MARQUES, E. C.; SILVA, J. C. B.; LACERDA, C. F.; PRISCO, J. T.; GOMES-FILHO, E. Nitrato modula os teores de cloreto e compostos nitrogenados em plantas de milho submetidas à salinidade. **Bragantia**, Campinas, v. 72, p. 10-19, 2013.

FENG, G.; ZHANG, Z.; WAN, C.; LU, P.; BAKOUR, A. Effects of saline water irrigation on soil salinity and yield of summer maize (*Zea mays* L.) in subsurface drainage system. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 193, p. 205-213, 2017.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

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

GOMES, K. R.; AMORIM, A. V.; FERREIRA, F. J.; FILHO, F. L. A.; LACERDA, C. F.; GOMES FILHO, E. Respostas de crescimento e fisiologia do milho submetido a estresse salino com diferentes espaçamentos de cultivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 4, p. 365-370, 2011.

IBGE, 2017. **Resultado da produção agrícola municipal 2016**, disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2013-agencia-de-noticias/releases/16814-pam-2016-valor-da-producao-agricola-nacional-foi-20-maior-do-que-em-2015.html>. Acesso em: 19 mar. 2018.

LACERDA, C. F.; CAMBRAIA, J.; CANO, M. A. O.; RUIZ, H. A.; PRISCO, J. T. Solute accumulation and distribution during shoot and leaf development in two sorghum genotypes under salt stress. **Environmental and Experimental Botany**, v.49, n.2, p.107-20, 2003.

LACERDA, C. F. DE; FERREIRA, J. F. S.; LIU, X.; SUAREZ, D. L. Evapotranspiration as a criterion to estimate nitrogen requirement of maize under salt stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.202, p.192-202, 2016.

LACERDA, C. F. DE; FERREIRA, J. F. S.; SUAREZ, D. L.; FREITAS, E. D.; LIU, X. Evidence of nitrogen and potassium losses in soil columns cultivated with maize under salt stress. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 8, p. 553-557, 2018.

MENDES, W. C.; ALVES JÚNIOR, A.; CUNHA, P. C. R.; SILVA, A. R.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D. Potassium leaching in different soils as a function of irrigation depths. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.20, n.11, p.972-977, 2016.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, [s. l.], v.59, p.651-668, 2008.

NAZÁRIO, A. Z.; BESTETE, L. O.; GARCIA, G. O.; REIS, E. F.; CECÍLIO, R. A. Desenvolvimento e produção do milho irrigado com água de diferentes condutividades elétricas. **Engenharia Ambiental**, Rio de Janeiro, v.10, n. 2, p.117-130, 2013.

RHOADES, J. D. Drainage for salinity control. *In*: VAN SCHILFGAARDE, J. (Ed.), **Drainage for Agriculture**. Agronomy Monograph No. 17. SSSA, Madison, 1974. p. 433–461.

RHOADES, J. D.; KANDIAH, A. M.; MARSHALI, A. M. **Uso de águas salinas para produção agrícola**. Campina Grande: UFPB, 2000, 117p.

RIBEIRO, A. A.; LACERDA, C. F.; NEVES, A. L. R.; SOUSA, C. H. C.; BRAZ, R. S.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, J. M. G.; FERREIRA, J. F. S. Uses and losses of nitrogen by maize and cotton plants under salt stress. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 66, p. 1-14, 2020. DOI: 10.1080/03650340.2020.1779228.

SANTOS, R. D.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7. ed. revista e ampliada. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015, 101 p. il.

SHENKER, M.; BEN-GAL, A.; SHANI, U. Sweet corn response to combined nitrogen and salinity environmental stresses. **Plant Soil**, v. 256, p.139-147, 2003.

SOARES FILHO, W. S.; GHEYI, H. R.; BRITO, M. E. B.; NOBRE, R. G.; FERNANDES, P. D.; MIRANDA, R. S. Melhoramento genético e seleção de cultivares tolerantes à salinidade. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. DA S.; LACERDA, C. F. DE; GOMES FILHO, E (ed.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 2.ed. Fortaleza: INCT Sal, 2016. Cap.17, p.259-274.

SOLOGUREN, L. Demanda mundial cresce e Brasil tem espaço para expandir produção. **Revista Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 13, p. 8-11, 2015.

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

TROEH, F. R.; THOMPSON, L. M. **Solos e fertilidade do solo**. 6.ed. São Paulo: Andrei, 2007. 718p. il.



### 3 EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA E PERDA DE NUTRIENTES EM COLUNAS DE SOLO CULTIVADAS COM MILHO SOB DIFERENTES SALINIDADES E FRAÇÕES DE LIXIVIAÇÃO

#### RESUMO

O uso da fração de lixiviação é uma técnica que tem por finalidade reduzir o acúmulo de sais da zona radicular das culturas, especialmente quando se utiliza águas salinas na irrigação. Entretanto, a fração de lixiviação pode também provocar grandes perdas de água e nutrientes do solo. Diante disso, testou-se no presente trabalho a hipótese de que o aumento da fração de lixiviação diminui a eficiência do uso da água (EUA) e aumenta as perdas de nutrientes do solo por lixiviação. Desta forma, objetivou-se avaliar a EUA e as perdas de macronutrientes em função de diferentes métodos de se determinar as frações de lixiviação (FL) na cultura do milho sob estresse salino, utilizando-se colunas de solo. Em adição, comparou-se os teores de elementos químicos na folha do milho e as concentrações sódio e cloro no lixiviado em função da FL adotada. O experimento foi instalado na área da estação meteorológica da Universidade Federal do Ceará, *campus* do Pici, Fortaleza – CE, em delineamento inteiramente casualizado, composto por 4 níveis de salinidade da água de irrigação –  $CE_a$  (0,5, 2,0, 4,0 e 6,0  $dS\ m^{-1}$ ) e 2 formas de determinação da FL e 7 repetições. As parcelas experimentais foram compostas por uma coluna de solo cultivada com milho. As FL foram determinadas pelos seguintes métodos: AS - Aplicação da FL calculada de acordo com a fórmula proposta por Rhoades; BS - Aplicação de 15% de FL calculada a partir do balanço hídrico do solo das parcelas experimentais. Foram avaliadas as seguintes variáveis: concentração de N, K, P, Ca, Mg, Na, Cl, relação Na/K e N/Cl no lixiviado e nas folhas do milho e a EUA. As concentrações foliares de elementos no milho foram maiores nos métodos em que a FL foi calculada a partir do balanço hídrico + 15% de FL (BS). A FL calculada pelo método de Rhoades (AS) promoveu a menor concentração de K no tecido foliar e a maior lixiviação desse elemento. Independente do método de determinação da FL, as concentrações foliares de N, P e K diminuíram em função do aumento da  $CE_a$ . Esses mesmos elementos foram mais lixiviados quando se adotou o método de Rhoades para calcular a FL. A EUA diminuiu à medida que aumentou a salinidade da água de irrigação, notadamente para o método de Rhoades. Diante dos resultados, concluímos que o método do

balanço hídrico + 15% de FL mostrou se como melhor técnica a ser adotada para determinação da fração de lixiviação.

**Palavras-chave:** *Zea mays*. Estresse salino. Nutrição mineral. Lixiviação de nutrientes. Produtividade da água.

## **WATER USE EFFICIENCY AND LOSS OF NUTRIENTS IN SOIL COLUMNS CULTIVATED WITH MAIZE UNDER DIFFERENT SALINITIES AND LEACHING FRACTIONS**

### **ABSTRACT**

The use of leaching fraction is a technique that aims to reduce the accumulation of salts in the root zone of crops, especially when using saline water for irrigation. However, the leaching fraction can also cause large losses of water and soil nutrients. Therefore, the present study tested the hypothesis that the increase in the leaching fraction decreases the water use efficiency (WUE) and increases the loss of soil nutrients by leaching. Thus, it was evaluated to WUE and macronutrients losses due to different methods to determine the leaching fractions (LF) in maize under salt stress, using soil columns. In addition, the levels of chemical elements in the maize leaf were compared and the sodium and chlorine concentrations in the leachate as a function of the adopted FL. The experiment was installed in the area of the Meteorological Station of the Federal University of Ceara, Pici campus, Fortaleza - CE, in a completely randomized design, composed of 4 salinity levels of irrigation water –  $EC_w$  (0.5, 2.0, 4.0 and 6.0  $dS\ m^{-1}$ ), 2 methods of determining the LF and 7 replications. The experimental plots were composed of a soil column grown with maize. The LF were determined by two methods: AS - Application of LF calculated for each level of salinity, according to the formula proposed by Rhoades; BS - Application of 15% LF calculated from the soil water balance of the experimental plots. The following variables were evaluated: concentration of N, K, P, Ca, Mg, Na, Cl, Na/K and N/Cl ratios of leachate and maize leaves and WUE. The leaf concentrations of elements in maize were higher in the methods in which the LF was calculated from the water balance + 15% LF (BS). The LF calculated by the method of Rhoades (AS) promoted the lowest concentration of K in the leaf tissue and the highest leaching of this element. Regardless of the method of determining LF, leaf concentrations of N, P and K decreased due to the increase in  $EC_w$ . These same elements were more leached when the method of Rhoades was adopted to calculate the LF. The WUE decreased as the salinity of irrigation water increased, notably for the method of Rhoades. From the results we conclude that the method of water balance + 15% LF showed up as best technique to be adopted for determining the leaching fraction.

**Keywords:** *Zea mays*. Salt stress. Mineral nutrition. Leaching of nutrients. Water productivity.

## INTRODUÇÃO

A fração de lixiviação é a lâmina de água aplicada no intuito de remover os sais solúveis da zona radicular (AYERS e WESTCOT, 1985). O estudo da água drenada ou lixiviado vem ganhando cada vez mais destaque nas últimas décadas. Isso porque a água usada para remover os sais também pode provocar grandes perdas de nutrientes importantes para o crescimento e desenvolvimento das plantas, sobretudo, quando estas estão em condições de estresse (SHENKER, BEN-GAL e SHANI, 2003; LACERDA *et al.*, 2016; LACERDA *et al.*, 2018).

Segundo Heng *et al.* (1991) o movimento de elementos químicos para fora da zona radicular pode representar uma perda imediata de nutrientes para a planta e uma perda econômica para o agricultor. Quando estes solutos chegam ao lençol freático e aos corpos hídricos superficiais eles também podem criar problemas ambientais e de saúde. Dentre os problemas mais recorrentes associados lixiviação de alguns nutrientes, está a eutrofização dos corpos d'água. De acordo com Biguelini e Gummy (2012), nas zonas rurais a eutrofização é causada principalmente pelo uso exacerbado de fertilizantes nitrogenados e fosfatados na agricultura.

Vários trabalhos (HENG *et al.*, 1991; SHENKER, BEN-GAL e SHANI, 2003; RISTVEY, LEA-COX e ROSS, 2004; EMBRAPA, 2011) sugerem que a quantidade de nutrientes perdida via água de irrigação (escoamento superficial e/ou percolação) deve-se a interação dos seguintes fatores: método de aplicação do fertilizante (aplicação direta no solo ou por fertirrigação), método de irrigação (localizado ou por superfície), tipo de solo, tipo de planta e as próprias características físico-químicas dos nutrientes.

A distribuição dos elementos químicos no solo depende da sua mobilidade e das suas reações com a matriz do solo (EMBRAPA, 2011). O nitrogênio, por exemplo, devido a sua complexidade de vias no ciclo biogeoquímico, da exigência nutricional das plantas e dos microrganismos edáficos, é o nutriente mais aplicado na agricultura (NOVAIS *et al.*, 2007; BRADY e WEIL, 2013; BRAZ *et al.*, 2019). Esse elemento também é o mais perdido, principalmente na forma de nitrato ( $\text{NO}_3$ ), devido sua alta solubilidade em água e suas constantes transformações no solo (BREDEMEIER e MUNDSTOCK, 2000; SHENKER, BEN-GAL e SHANI, 2003; LACERDA *et al.*, 2018).

Comparados ao nitrogênio, o fósforo e o potássio têm menores percentuais de perdas por lixiviação. Entretanto, estima-se que mais de 55% do fósforo aplicado no solo não é aproveitado pela planta (OWEN JR *et al.*, 2008). Esse percentual pode ser superior a 90% devido a fixação desse nutriente em solos com altos teores de óxido de ferro, como em parte significativa dos solos brasileiros (ROY *et al.*, 2016; ROY *et al.*, 2017).

Devido a sua solubilidade, o potássio tem a maior capacidade de ser distribuído no solo, bem como, de ser lixiviado, quando comparado ao fósforo. Entretanto, suas perdas costumam ser inferiores às do nitrogênio. Segunda a Embrapa (2011), diante de suas características físico-químicas, o potássio pode ser usado na fertirrigação sem problemas de entupimentos do sistema, mesmo quando adicionado de fontes sólidas. Já no solo, a movimentação desse elemento vai depender da sua concentração, da capacidade de troca catiônica e da quantidade de outros íons de cargas semelhantes nas superfícies de adsorção dos coloides.

Heng *et al.* (1991) relataram diversos resultados sobre perdas de nutrientes do solo na Nova Zelândia nas décadas de 1970 e 1980. Os autores abordaram principalmente a interação de diversos ânions e cátions oriundos de diferentes fertilizantes. Esses estudos apontaram, por exemplo, que a aplicação da adubação potássica por meio de KCl aumentou a lixiviação de cloro. Em adição, a adubação fosfatada usando-se o superfosfato simples, promoveu maior perda de enxofre na forma de  $\text{SO}_4^{2-}$ . Esses resultados indicam que a interação entre os íons presentes no sistema água-solo é um importante fator na concentração de determinados nutrientes perdidos por lixiviação.

As perdas dos nutrientes por lixiviação podem ser mais expressivas em sistemas onde os vegetais estão submetidos ao estresse salino. Nessa situação, as plantas tendem a diminuir sua demanda de água e, conseqüentemente, de nutriente, devido ao decréscimo do potencial osmótico do solo, a toxicidade do sódio e cloro e o desbalanço nutricional provocado por estes íons (LACERDA *et al.*, 2003; MUNNS e TESTER, 2008; FAROOQ *et al.*, 2015). Essas perdas de nutrientes podem ser agravadas quando se usam frações de lixiviação superiores àquelas necessárias para diminuir a concentração de sais na zona radicular.

A eficiência do uso da água (EUA) é um dos indicadores mais difundido na avaliação da resposta das culturas as diferentes condições de disponibilidade de água (SOUZA *et al.*, 2011). De acordo com Sinclair, Tanner e Bennett (1984), quanto menor

a quantidade de água requerida para a produção de biomassa de uma determinada cultura, maior é a EUA. A literatura mostra que quando as plantas estão submetidas ao estresse salino, existe uma redução significativa da EUA. Essa redução, em geral, é proporcional ao aumento da concentração de sais no solo e/ou na água de irrigação (GARCIA *et al.*, 2007a; LACERDA *et al.*, 2016).

Apesar da resposta positiva da remoção dos sais com o aumento da fração de lixiviação adotada, o emprego de elevadas lâminas de lixiviação pode diminuir a EUA e aumentar consideravelmente as perdas de nutrientes em plantas irrigadas com águas salinas (GARCIA *et al.*, 2007a; LACERDA *et al.*, 2016; LACERDA *et al.*, 2018).

Diante do exposto, foi testado no presente estudo a hipótese de que o aumento da fração de lixiviação reduz a eficiência do uso da água e promove maiores perdas de nutrientes do solo. Desta forma, objetivou-se analisar a eficiência do uso da água e as perdas de macronutrientes em função de duas diferentes formas de determinação da fração de lixiviação (FL) em plantas de milho cultivadas em colunas de solo e submetido ao estresse salino. Além disso, comparou-se os teores de elementos químicos na folha do milho e as concentrações sódio e cloro no lixiviado em função da FL adotada.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi instalado e conduzido no período de novembro de 2017 a fevereiro de 2018 em casa de vegetação na área da estação meteorológica da Universidade Federal do Ceará - UFC, *campus* do Pici, Fortaleza – Ceará. As coordenadas geográficas do local são 3° 45' S e 38° 33' W e altitude de 19 m. De acordo com a classificação de Köppen, a área do experimento está inserida em uma região de clima Aw', ou seja, tropical chuvoso, muito quente, com predomínio de chuvas nas estações do outono e do verão.

### Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), com arranjo de tratamentos em parcelas subdivididas, com sete repetições. As parcelas foram formadas por duas formas de determinar a fração de lixiviação e as subparcelas por quatro níveis de salinidade da água de irrigação – CE<sub>a</sub> (0,5, 2,0, 4,0 e 6,0 dS m<sup>-1</sup>).

As frações de lixiviação (FL) foram definidas da seguinte forma: AS - Aplicação das frações de lixiviação calculada para cada nível de salinidade, de acordo com a fórmula proposta por Rhoades (1974); BS - Aplicação de frações de lixiviação de 15% calculada a partir do balanço hídrico do solo das parcelas experimentais. A composição dos tratamentos pode ser observada na Tabela 1 do capítulo 1.

Para o preparo dos tratamentos salinos foram adicionados à água do poço, cloreto de sódio (NaCl), cloreto de cálcio (CaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O) e cloreto de magnésio (MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O), na proporção equivalente a 7:2:1, obedecendo-se a relação entre CE<sub>a</sub> e sua concentração (mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> = CE x 10), conforme Rhoades, Kandiah e Marshali (2000). Antes de cada irrigação a condutividade elétrica da água de cada tratamento era verificada por meio de condutímetro digital portátil.



## Coleta do solo e montagem das colunas

As parcelas experimentais foram compostas por uma coluna de solo cultivada com milho. Para a confecção das colunas de solo, utilizaram-se tubos de PVC rígido com diâmetro interno de 20 cm e comprimento de 100 cm (FIGURA 1). As extremidades inferiores foram fechadas e vedadas com tampas de PVC (caps). A parede interna dos tubos recebeu uma camada de cola com areia para impedir o fluxo preferencial de água entre o solo e a parede do tubo. A extremidade basal da coluna foi preenchida com areia grossa até a altura de 5 cm para facilitar a drenagem.

Figura 1 – Imagem das colunas com os milhos aos 07 dias após a semeadura, antes do desbaste (A); Milhos aos 65 dias após a semeadura (B)



Fonte: elaborado pelo autor.

Para permitir a drenagem e coleta do lixiviado, as tampas foram perfuradas e acopladas a mangueiras. As mangueiras foram conectadas a frascos plásticos de 1000 mL posicionados na base das colunas abaixo do nível do solo.

A coleta do solo usado no preenchimento das colunas foi realizada por meio de abertura de trincheira na área experimental pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará - UFC, *campus* do Pici, Fortaleza – Ceará. O solo da área foi classificado como ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico Típico, de acordo com Embrapa (2018).

As delimitações dos horizontes foram feitas de acordo com a descrição morfológica do perfil, conforme Santos *et al.* (2015). A partir das marcações estabelecidas com base na espessura dos horizontes, procederam-se as coletas das amostras de solo no intuito de simular, nas colunas, a mesma sequência dos horizontes encontrados “*in situ*”. Deste modo, amostras de cada horizonte do solo foram retiradas e peneiradas (em peneiras de malha de 2 mm) separadamente, para posterior montagem das colunas.

As colunas foram montadas obedecendo a mesma sequência dos horizontes dos solos tais quais se encontram no campo. Porém, devido ao fato da espessura dos horizontes exceder o comprimento da coluna, foram definidas três camadas dentro do comprimento de 1 m de profundidade. Deste modo, realizou-se as seguintes divisões: primeira camada, material recolhido do horizonte A (0-20 cm); segunda, material recolhido nos horizontes E e EB (21-60 cm); terceira, material recolhido no horizonte B textural (61-90 cm).

Após a coleta do solo, amostras de cada horizonte foram utilizadas para caracterização dos atributos físicos e químicos: granulometria, densidade, umidade na capacidade de campo e ponto de murcha permanente, pH, condutividade elétrica do extrato de saturação, cátions trocáveis, CTC, teor de carbono orgânica, nitrogênio e fósforo de acordo com método descrito em Embrapa (2017).

As duas primeiras camadas do solo apresentaram textura classificada como areia franca. A terceira e última camada, mais argilosa, foi classificada como franco argiloarenosa. A CE média das camadas foi de  $0,11 \text{ dS m}^{-1}$  ( $\pm 0,1 \text{ dS m}^{-1}$ ) e o pH variou entre 6,3 a 5,7. Para o percentual de saturação por sódio (PSS), foram constatados os seguintes valores: 4,42 (0-20 cm), 6,96 (21-60 cm) e 4,21% (61-90 cm).

## **Semeadura e condução do experimento**

A cultura utilizada no experimento foi o milho (*Zea mays* L.) híbrido BRS 2020. Cada coluna de solo recebeu quatro sementes de milho e, sete dias após a semeadura, procedeu-se o desbaste deixando-se apenas uma planta por coluna. No dia seguinte ao desbaste, iniciou-se a aplicação da água salina de acordo com cada tratamento.

A adubação das plantas foi realizada de acordo com a recomendação da Embrapa (2006) para a cultura do milho. A adição do nitrogênio e do potássio foi parcelada, sendo 15% durante a semeadura, 25% fornecido 20 dias após a semeadura (DAS), 30% aos 35 DAS e os 30% restantes aos 50 DAS. O fósforo foi aplicado em única adubação, em fundação. Cada coluna recebeu 5,8 g de ureia, 8,3 g de superfosfato simples e 2 g de cloreto de potássio, respectivamente equivalentes a 200 kg de N ha<sup>-1</sup>, 120 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> e 90 kg de K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>.

Para determinar a necessidade hídrica da cultura, uma parcela de cada tratamento foi utilizada como lisímetro de drenagem. A irrigação do experimento era realizada com o auxílio de provetas a cada dois dias até os 30 DAS. Após esse período, as irrigações tornaram-se diárias até o encerramento do experimento. As aplicações das frações de lixiviação ocorriam a cada irrigação de acordo com cada tratamento. Para tal, levava-se em consideração o volume de água aplicada e o volume de água drenada do dia anterior de cada parcela.

A água drenada de cada coluna era quantificada 24h após cada irrigação. Após a quantificação do drenado, alíquotas de 10% do volume total eram coletadas e transferidas para frascos plásticos foscos e armazenados sob refrigeração (4 °C) até um dia antes da realização das análises químicas no lixiviado.

## **Variáveis analisadas**

### ***Teores foliares de elementos químicos***

Ao final do experimento (80 DAS) as plantas foram coletadas. As folhas foram colocadas em sacos de papel devidamente identificados e alocados em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C para secagem até uma massa constante.

Posteriormente, o material foi moído em moinho de facas e, por fim, utilizado para análise dos elementos químicos.

O teor de nitrogênio foliar foi determinado de acordo com Baethgen e Alley (1989). A princípio, pesou-se 50 mg do material vegetal (seco e moído), sendo o material transferido para tubos de digestão. Adicionou-se aos tubos 1,1 g da mistura catalisadora ( $K_2SO_4 + CuSO_4 + Se$ ) e 2 mL de ácido sulfúrico PA. Então, os tubos foram levados ao bloco digestor, onde a temperatura foi progressivamente elevada até 350 °C para que ocorresse a mineralização das amostras.

Após resfriada, o conteúdo dos tubos foi transferido para balões volumétricos de 25 mL e adicionado água deionizada até o menisco de aferição do balão. Na sequência, utilizando tubos de ensaio, adicionou-se mais 1 mL da amostra digerida convenientemente diluída, 5,5 mL da solução de  $Na_2HPO_4$  a 0,1 M +  $KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O + NaOH$  a 5,4 %, 4 mL da solução de  $C_7H_5NaO_3$  a 15 % +  $Na_2[Fe(CN)_5NO] \cdot 2H_2O$  a 0,03 e 2 mL da solução de  $NaClO$  a 0,31 %. As leituras foram feitas em triplicata em espectrofotômetro usando o comprimento de onda de 650 nm.

A digestão úmida com ácido nitroperclórico ( $HNO_3 + HClO_4$  na proporção de 3:1) foi utilizada na determinação dos teores foliares de potássio, fósforo, cálcio, magnésio e sódio, conforme Embrapa (2009). Procedeu-se a pesagem de 500 mg da amostra do tecido vegetal e, na sequência, o material foi transferido para tubos de digestão onde permaneceu por 4 horas na presença de 8 mL do ácido nitroperclórico a temperatura ambiente. Após esse período, as amostras foram levadas ao bloco digestor aumentando-se gradualmente a temperatura até 120 °C.

Depois de resfriadas as amostras foram filtradas e transferidas para balões volumétrico de 25 mL, onde completaram-se as alíquotas com água destilada. A determinação dos teores de cálcio e magnésio foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica (AOAC, 2005). Já os teores de sódio e potássio foliar foram realizados por fotometria de chama.

O fósforo foi determinado na presença de ácido ascórbico a 10%. O extrato foi previamente diluído, aplicando-se 1 mL do extrato mais 2 mL da solução diluída de molibdato de amônio (molibdato + subcarbonato de bismuto + ácido sulfúrico) nos tubos de ensaio e agitados (BRAGA e DEFELIPO, 1974). As leituras foram realizadas por espectrofotometria a um comprimento de onda de 820 nm.

O método proposto por Gaines, Parker e Gascho (1984) foi aplicado para a determinação dos teores de cloreto no tecido vegetal. O extrato base diluído recebeu

0,5 mL da mistura de tiocianato de mercúrio ( $\text{Hg}(\text{SCN})_2$ ) a 13,2 mM dissolvido em metanol absoluto e  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  a 20,2% dissolvido em água deionizada, na proporção de 4:1. As leituras foram realizadas em triplicatas no espectrofotômetro, utilizando um comprimento de onda de 460 nm.

### ***Eficiência do uso da água (EUA)***

Aos 80 DAS as espigas de milho foram coletadas e colocadas em sacos de papel devidamente identificados. Em seguida, as amostras foram submetidas a secagem em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C até a massa constante. Por fim, o material foi pesado em balança analítica de precisão.

De posse dos dados de matéria seca da espiga e da quantidade de água total aplicada durante o ciclo da cultura, determinou-se a eficiência do uso da água (EUA) para cada tratamento. Os valores de EUA foram estimados pela razão entre massa de matéria seca de espiga (em grama) pelo volume de água total aplicado na planta (em litros), conforme Sinclair, Tanner e Bennett (1984).

### ***Avaliação dos elementos químicos do lixiviado***

As coletas dos lixiviados ocorriam diariamente. Do volume total de água lixiviada 24h após a irrigação, era coletada uma alíquota de 10% e, a cada 15 dias, o volume total das alíquotas desse período eram analisados.

As concentrações de sódio, potássio e cálcio foram medidas diretamente nas amostras de água do lixiviado, utilizando-se o fotômetro de chama. As leituras do nitrato, cloreto e fósforo foram realizadas por meio de espectrofotometria.

O nitrato das amostras foi determinado na presença de ácido salicílico a 5% e hidróxido de sódio (NaOH a 2 N), de acordo com Cataldo *et al.* (1975). A leitura foi realizada por espectrofotometria ( $\lambda = 410$  nm). O cloreto foi determinado na presença de uma solução de triocianato de mercúrio em metanol absoluto mais nitrato de ferro a 20,2%, formando uma solução de  $\text{Hg}(\text{SCN})_2 - \text{Fe}(\text{NO}_3)_3$  na proporção de 4:1 segundo método descrito por Gaines, Parker e Gascho (1984). A leitura do cloreto foi realizada a um comprimento de onda de 460 nm.

Para a determinação do fósforo adicionou-se aos tubos de ensaio contendo as amostras de água, 10 mL da solução diluída de molibdato de amônio mais 100 µL da solução de ácido ascórbico a 10%. Os teores de P foram determinados através de leituras de absorvância a um comprimento de onda de 820 nm, pelo método azul de molibdênio. Para essa determinação, utilizou-se como base uma curva padrão ajustada a partir de soluções com concentrações crescentes de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (BRAGA e DEFELIPO, 1974).

### **Análises estatísticas**

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F e para o teste de comparação de médias, aplicou-se Tukey (comparação dos métodos de estimativa da fração de lixiviação). Para os níveis de salinidade utilizou-se análise de regressão. A análise estatística foi realizada com auxílio do software SISVAR versão 5.6, considerando o nível de confiança de 95% (FERREIRA, 2011).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Teores foliares de elementos químicos

A determinação dos teores dos elementos químicos no tecido vegetal nos fornece valiosas informações a respeito do balanço de nutrientes nas culturas. Com exceção do nitrogênio, todos os elementos químicos estudados apresentaram diferença significativa a nível de 5% de probabilidade pelo teste F na interação entre o método de determinação da FL e salinidade da água de irrigação, de acordo com a Tabela 1. O método de determinação da FL também influenciou os teores de K, Ca, Na e Cl, com os maiores valores médios quando se utilizou o balanço hídrico (BS).

Tabela 1 – Resumo da análise de variância com os valores  $F_{\text{calculado}}$  para a concentração foliar de nitrogênio (N), potássio (K), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), cloro (Cl), sódio (Na), relação Na/K e N/Cl e eficiência do uso da água (EUA)

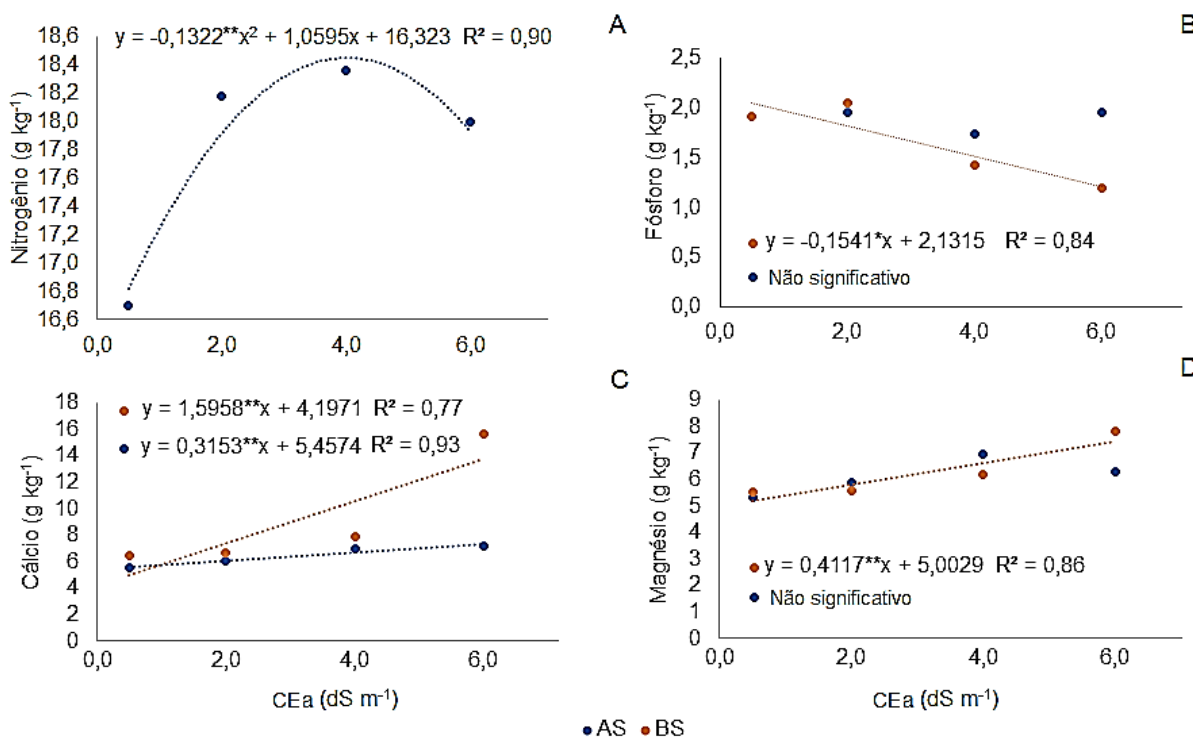
FV	Valores de F calculado										
	N	P	K	Ca	Mg	Na	Cl	Na/K	N/Cl	EUA	
FL (A)	0,68ns	1,83ns	186,05**	9,41*	0,19ns	101,18**	7,65*	0,08ns	1,17ns	2,27ns	
Sal. (B)	6,79**	2,07ns	46,40**	13,65**	7,36**	7,40**	21,26**	19,37**	14,71**	5,52**	
AxB	1,70ns	3,12*	17,10**	9,32**	3,05*	17,60**	13,48**	4,78**	6,89**	3,29*	
CV <sub>1</sub> (%)	5,71	22,08	12,58	34,28	22,43	20,51	12,24	35,60	14,01	30,77	
CV <sub>2</sub> (%)	5,29	28,18	12,46	29,02	15,54	29,62	12,32	34,86	10,90	29,45	
	----- g kg <sup>-1</sup> -----							--	--	g L <sup>-1</sup>	
Média AS	17,66	1,80	8,00 b	6,50 b	6,00	0,93 b	1,38 b	0,13	13,01	24,84	
Média BS	17,90	1,65	13,00 a	9,25 a	6,50	1,75 a	1,73 a	0,14	12,15	28,25	

FV – Fonte de variação, FL – Fração de lixiviação, Sal. – Salinidade da água, CV – coeficiente de variação, ns, \*\*, \* Não significativo, significativo a 1% e 5% de probabilidade pelo Teste F, respectivamente. AS: fração de lixiviação calculada de acordo com fórmula proposta por Rhoades; BS: fração de lixiviação determinado a partir do balanço hídrico + 15% de FL.

Não houve diferença estatística ( $p < 0,05$ ) no teor de nitrogênio foliar para os métodos de determinação da FL. Nesse caso, o aumento da  $CE_a$  foi o fator determinante para a concentração de N no tecido foliar das plantas de milho. Os valores médios do N foliar encontraram-se abaixo de 20 g kg<sup>-1</sup> de MS em todos os tratamentos (TABELA 1 e FIGURA 2A). É importante ressaltar que existe uma tendência de decréscimo de N no milho ao passo que aumenta-se a idade da planta (JONES JR *et al.*, 1991; FERREIRA *et al.*, 2001). Ferreira *et al.* (2001) verificaram em

plantas de milho a redução de N de 27,3 g kg<sup>-1</sup> aos 45 dias para 20,0 g kg<sup>-1</sup> aos 63 dias após a emergência. Para o presente estudo, as análises dos elementos químicos foliares ocorreram quando a planta estava com 80 DAS.

Figura 2 – Curvas de regressão do nitrogênio (A), fósforo (B), cálcio (C) e magnésio (D) foliar para diferentes métodos de determinação da FL e diferentes CE da água de irrigação. Análises realizadas em folhas de milho aos 80 dias após a semeadura



AS: fração de lixiviação calculado de acordo com fórmula proposta por Rhoades; BS: fração de lixiviação determinado a partir do balanço hídrico + 15% de FL. "\*\*\*" e "\*" significativo a nível de 1% e 5% de probabilidade pelo Teste F, respectivamente.

A curva resposta para o nitrogênio foliar foi do tipo quadrática. O teor de N foi crescente à medida que a salinidade da água aumentou, chegando ao ponto máximo (18,45 g de N kg<sup>-1</sup>) quando a CE<sub>a</sub> foi de 4 dS m<sup>-1</sup>. A partir de 4 dS m<sup>-1</sup>, os teores de N foliar foram decrescentes, refletindo o estresse salino nos processos metabólicos da planta. O resultado está de acordo com o obtido por Gadalla *et al.* (2007), onde os autores verificaram a redução nos teores de N na parte aérea e nos grãos do milho, sendo que a redução máxima ocorreu quando a irrigação foi realizada com água de CE = 6 dS m<sup>-1</sup>.

O nitrogênio é o elemento mais exigido pelos vegetais. Dentre as várias funções atribuídas ao N, podemos destacar a composição das moléculas de clorofila e dos aminoácidos (TAIZ *et al.*, 2017; BHATLA e LAL, 2018). Sua deficiência se



caracteriza pela clorose inicialmente nas folhas velhas, colmos finos e plantas de baixo porte. Essas características foram notadas visualmente no experimento nas plantas irrigadas com água de  $CE \geq 4 \text{ dS m}^{-1}$ .

Em relação ao fósforo foliar, constatou-se que apenas na interação entre a salinidade e o método de determinação da FL houve diferença estatística significativa ( $p < 0,05$ ). Nesse caso, a concentração de P foliar decresceu de forma linear e inversamente proporcional ao aumento da  $CE_a$  (FIGURA 2B), mas apenas quando se utilizou o método do balanço hídrico +15% de FL (BS). Os valores médios encontrados de P foliar entres os métodos de determinação da FL não diferiram entre si e foram de 1,80 e 1,65  $\text{g kg}^{-1}$ , respectivamente, para a FL determinada por Rhoades (AS) e pelo balanço hídrico + 15% (BS). Esses valores estão acima do valor de 1,60  $\text{g kg}^{-1}$  de MS, encontrado por Ferreira *et al.* (2001) em estudo de campo com a cultura do milho. Porém, encontra-se ligeiramente abaixo dos valores considerados suficientes para a cultura, que é de 2,2 a 5  $\text{g kg}^{-1}$  de MS (JONES JR *et al.*, 1991; MALAVOLTA *et al.*, 1997; CANTARUTTI *et al.*, 2007).

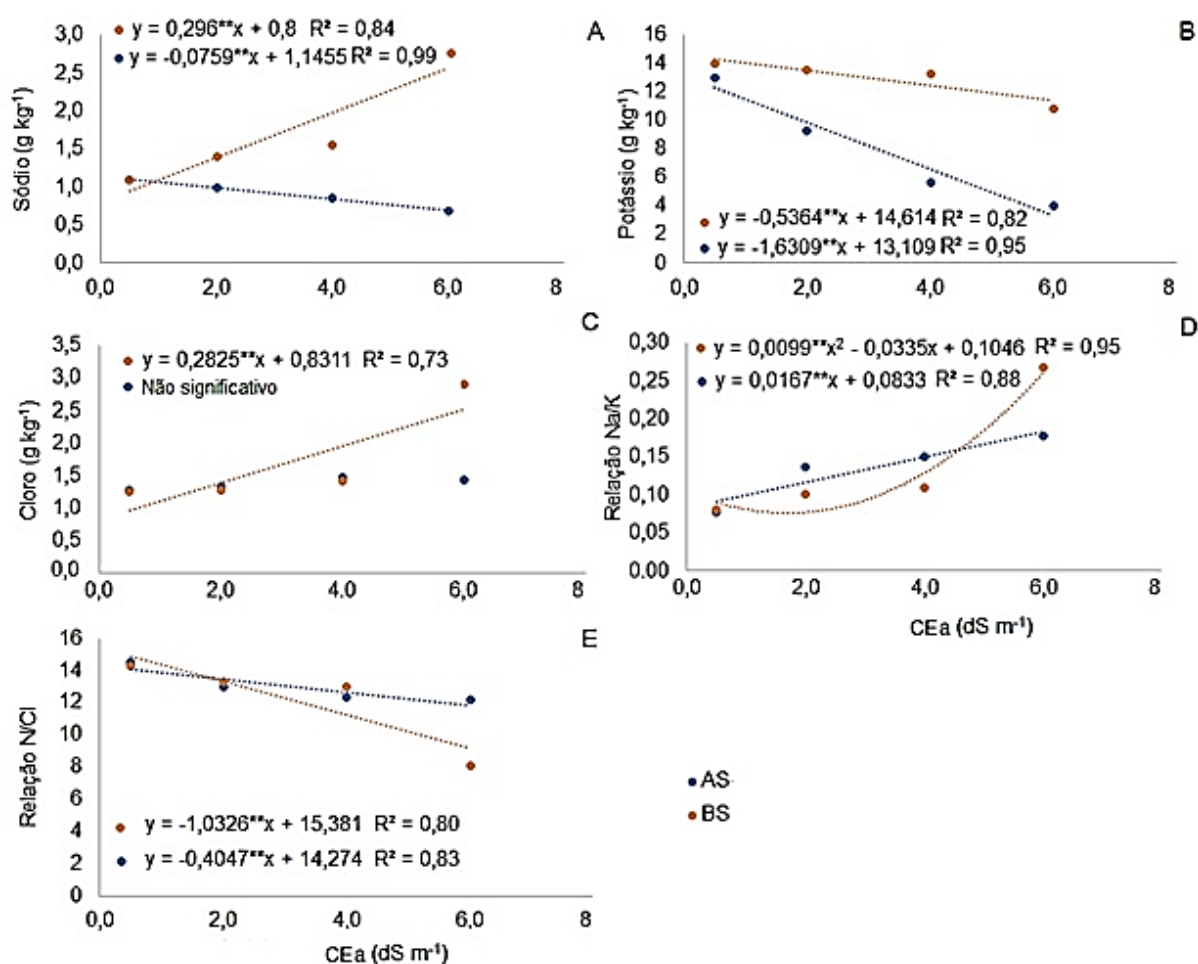
O cálcio e magnésio foliar apresentaram respostas com o padrão de crescimento linear e diretamente proporcional ao aumento da salinidade da água, conforme as Figuras 2C e 2D, com os incrementos sendo maiores quando se utilizou o balanço hídrico +15% de FL (BS). Diferente dos valores de N e P, os íons Ca e o Mg mantiveram concentrações superiores aqueles de referência nutricional para a cultura do milho (MALAVOLTA *et al.*, 1997; CANTARUTTI *et al.* 2007). Para AS (método de Rhoades), o valor médio de Ca na folha foi 6,50  $\text{g kg}^{-1}$  de MS, enquanto para o Mg foi de 6,0  $\text{g kg}^{-1}$  de MS. No caso do balanço hídrico + 15% de FL (BS), os valores foram de 9,25 e 6,50  $\text{g kg}^{-1}$  de MS, respectivamente para o Ca e Mg. De acordo com Cantarutti *et al.* (2007) a faixa crítica de suficiência para esses elementos na cultura do milho é de 4,50  $\text{g kg}^{-1}$  de MS para o Ca e 2,50  $\text{g kg}^{-1}$  de MS para o Mg.

Apesar de serem macronutrientes, as altas concentrações de Ca e Mg foliar não tem relação com melhor desenvolvimento das plantas para esse caso específico. A principal fonte desses elementos para o vegetal foi a água de irrigação, nas proporções de 20% ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e 10% ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), do total de sais adicionados no preparo dos tratamentos salinos. Ainda assim, quando comparam-se as retas obtidas pelas respostas das plantas aos métodos de determinação da FL, a inclinação da reta correspondente a BS (coef. angular de 1,59) foi superior a inclinação do AS (coef. angular de 0,32). Desta forma, o incremento da concentração de Ca na folha do

milho tendeu a ser maior em BS quando comparadas ao AS a cada unidade de aumento da salinidade da água.

Infere-se que o grande volume de água usado para a lixiviação dos sais no tratamento AS (que chegou até a 92% da lâmina de irrigação), foi capaz de remover parte desse elemento da zona radicular do milho. Análise semelhante pode ser apontada para o caso do sódio, potássio e cloro nesse mesmo tratamento (FIGURA 3). Para o Na foliar, os padrões de respostas para AS e BS foram opostos, conforme verifica-se na Figura 3A.

Figura 3 – Curvas de regressão do sódio (A), potássio (B), cloro (C), relação Na/K (D) e relação N/Cl (E) foliar para diferentes métodos de determinação da FL e diferentes CE da água de irrigação. Análises realizadas em folhas de milho aos 80 dias após a semeadura



AS: fração de lixiviação calculado de acordo com fórmula proposta por Rhoades; BS: fração de lixiviação determinado a partir do balanço hídrico + 15% de FL. "\*\*\*" significativo a nível de 1% de probabilidade pelo Teste F.

Enquanto observou-se aumento da concentração de sódio foliar em função da  $CE_a$  em BS, para AS ocorreu o inverso. Porém, com menor intensidade, como pode ser verificado pela inclinação das retas na Figura 3A. A FL calculada a partir de Rhoades mostrou-se capaz de manter a concentração média de Na abaixo de  $0,94 \text{ g kg}^{-1}$  de MS. Entretanto, nos tratamentos que a FL foi determinada pelo método do balanço hídrico +15% de FL, a concentração de Na foi 88% superior ( $1,75 \text{ g kg}^{-1}$  de MS). Mesmo que os valores médios de sódio nas folhas desses tratamentos sejam considerados baixos para um ambiente salino, eles podem interferir no metabolismo vegetal (GARCIA *et al.*, 2007b). Nesse caso, deve-se levar em consideração também a relação Na/K que será discutido posteriormente neste capítulo.

Para o potássio foliar, verificou-se uma queda linear em função do aumento da  $CE_a$  para ambos os métodos de determinação da FL. No entanto, diferindo à nível de 1% de significância, o decréscimo na concentração do elemento na folha foi mais acentuado em AS quando comparado a BS. Revelando desta forma, que o maior volume de água usado na FL desse método, não removeu apenas íons que podem promover toxidez a planta (como o Na), mas também elementos essenciais como o K.

Mendes *et al.* (2016) avaliaram o K em dois solos de texturas distintas em função do volume de água aplicada. Para ambos os solos, o aumento da lâmina de água promoveu o aumento da perda de K por lixiviação. A lixiviação desse elemento reflete-se em um menor crescimento e produção das plantas devido à ausência ou a baixa quantidade desse nutriente para os processos metabólicos do vegetal.

Além do sódio, um dos principais componentes da salinidade da água com importante influência na produção vegetal, é o cloro (AZEVEDO NETO e TABOSA, 2000; DIAS *et al.*, 2016). Os teores médios de cloro foliar ( $1,38 \text{ g kg}^{-1}$ ) foram superiores aos de sódio ( $0,93 \text{ g kg}^{-1}$ ) nos tratamentos AS e, praticamente iguais nos tratamentos BS, respectivamente,  $1,73$  e  $1,75 \text{ g kg}^{-1}$  (TABELA 1). Para AS não houve diferença estatística de Cl em função da salinidade. Porém, constatou-se em BS um aumento linear do elemento e diretamente proporcional ao incremento da  $CE_a$  (FIGURA 3C). O cloro é um nutriente essencial exigido em baixa quantidade pelas plantas. Entretanto, em ambiente salino, sua concentração na parte aérea vegetal pode superar a de alguns macronutrientes (CHEN *et al.*, 2010). Em quantidades elevadas, além do efeito tóxico do elemento, este pode atuar inibindo a absorção de nitrato pelas plantas, limitando o seu crescimento e produção (SHENKER, BEN-GAL e SHANI, 2003).

Na complexa relação solo-água-planta, a interação entre os componentes iônicos pode contribuir para maior ou menor absorção e, conseqüentemente, concentração desses elementos no tecido foliar (GARCIA *et al.*, 2007b). Os efeitos antagonistas entre os íons são observados, particularmente em ambientes salinos, entre os cátions Na e K, e o ânions  $\text{NO}_3$  e Cl. Essas interações podem ser analisadas nas Figuras 3D e 3E.

As curvas respostas da relação Na/K para os métodos AS e BS apresentaram padrões distintos, sendo que AS foi melhor representada pela regressão linear ( $R^2 = 95\%$ ), enquanto a BS pela quadrática ( $R^2 = 88\%$ ). A interação entre a salinidade e os métodos de determinação da FL foi significativa a nível de 1% de significância, onde as distâncias entre as médias de AS e BS para a relação Na/K tornaram-se mais expressivas a partir da  $\text{CE}_a$  de  $4,77 \text{ dS m}^{-1}$  (ponto de interseção calculado). A partir deste ponto, o tratamento BS apresentou valores superiores de relação Na/K quando comparado ao AS (FIGURA 3D).

Trabalhos de Azevedo Neto e Tabosa (2000) com duas cultivares de milho, uma sensível e outra tolerante a salinidade, mostrou em ambos os casos o aumento da relação Na/K nas folhas em função da maior salinidade da solução nutritiva fornecida ao vegetal. Farooq *et al.* (2015) discorreram que para o milho, o sódio é o íon que mais interfere na absorção e transporte de potássio, provocando perturbações nas modulações estomáticas e causando perda de água e necrose na planta. A competição entre Na e K em ambiente salino reduz drasticamente o teor de potássio nas folhas e raízes do milho (AZEVEDO NETO e TABOSA, 2000) e reduz o teor de K em até 64% no simplasto do tecido de expansão sob estresse salino (FAROOQ *et al.*, 2015). De acordo com Taiz *et al.* (2017), no citosol das plantas, a alta relação Na/K bem como a concentração elevada de sais totais (como cloretos) inativam as enzimas e inibem a síntese proteica.

O cloro, na forma de cloreto, é o ânion mais abundante em ambientes salinos e, assim como o sódio, interfere na absorção de nutrientes essenciais como o nitrogênio. A relação N/Cl foliar para ambos os métodos de determinação da FL foi linear e inversamente proporcional ao aumento da  $\text{CE}_a$  (FIGURA 3E). Entretanto, o decréscimo da relação N/Cl tende a ser maior no método do balanço hídrico + 15 de FL (BS), sobretudo, devido ao maior acúmulo de cloro foliar observado na Figura 3C.

Feijão *et al.* (2013), verificaram que o aumento da concentração de  $\text{NO}_3$  na solução nutritiva do milho cultivado em sistema hidropônico, promoveu menor

absorção de cloreto pela planta. Dias *et al.* (2016) explanaram sobre vários trabalhos que mostraram o efeito antagonista do cloro em relação ao nitrogênio no tecido vegetal. De acordo com esses autores, a menor concentração de nitrato no vegetal deve-se à interação  $\text{NO}_3/\text{Cl}$  nos sítios de absorção (inibição competitiva) e/ou pela despolarização da membrana plasmática provocada pelo sódio (inibição não-competitiva).

De maneira geral, as concentrações de elementos químicos nas folhas do milho foram maiores nos métodos em que a FL foi calculada a partir do balanço hídrico + 15% de FL (BS). Os maiores volumes de água empregado pelo método de Rhoades (AS) promoveu a menor concentração no tecido foliar de íons presente na composição salina da água (Na, Cl, Ca e Mg). Porém, promoveu a menor absorção de K, devido tanta a lixiviação desse elemento, quanto pela competição com o Na.

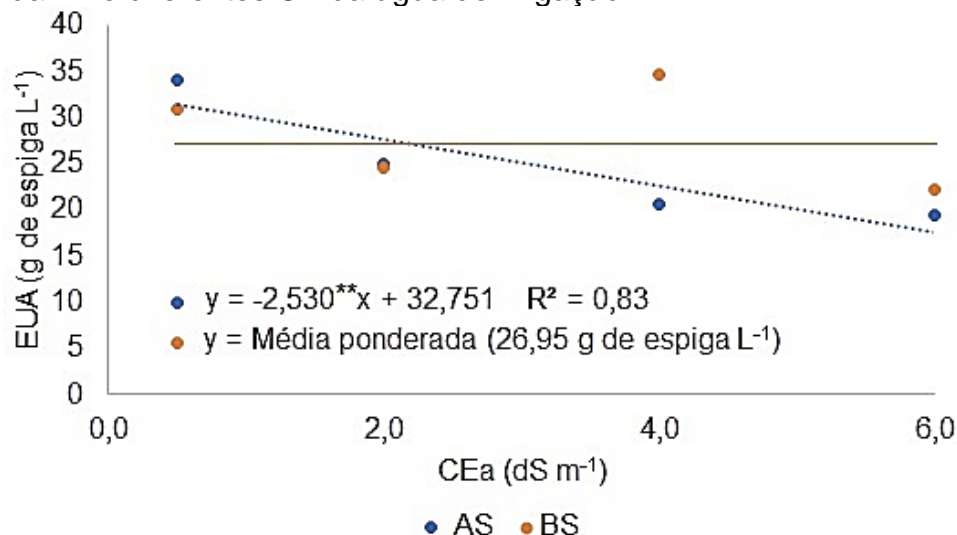
### **Eficiência do uso da água (EUA)**

A quantidade de água aplicada durante o ciclo de uma cultura é um importante dado na escolha do manejo que será adotado. Estima-se que 85% da água usada pela humanidade é destinado a irrigação das lavouras (FALKENMARK e ROCKSTRÖM, 2004). Nesse caso, as comparações de resultados da EUA é uma ferramenta que auxilia na decisão de qual o método de determinação da FL deve ser adotado no manejo da salinidade.

Observou-se interação significativa ( $p < 0,05$ ) entre os métodos de determinação da FL e a  $\text{CE}_a$ . No entanto, para BS não foi possível encontrar uma representação matemática para as respostas obtidas. Já em AS, verificou-se o decréscimo linear da eficiência do uso da água à medida que aumentou a CE da água de irrigação (FIGURA 4).

Utilizando a média ponderada da EUA (calculado levando-se em consideração cada nível de  $\text{CE}_a$ ), observou-se que em BS a cada litro de água aplicada foi produzido 26,95 g de matéria seca de espiga, contra 21,36 g produzido por AS. Em termos práticos, a quantidade de água utilizada para produzir uma mesma quantidade de matéria seca de espiga foi superior quando a FL foi calculada pela fórmula proposta por Rhoades (AS), em especial, quando as concentrações de sais na água foram mais elevadas.

Figura 4 – Curvas de regressão da eficiência de uso da água (EUA) da cultura do milho submetido a diferentes métodos de determinação da FL e diferentes CE da água de irrigação



AS: fração de lixiviação calculado de acordo com fórmula proposta por Rhoades; BS: fração de lixiviação determinado a partir do balanço hídrico + 15% de FL. “\*\*\*”significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F. “Y = Média ponderada” foi utilizado para representar casos em que encontrou-se diferença estatística significativa ( $p < 0,05$ ), porém, sem modelo de regressão satisfatório.

Em AS, a quantidade média (ponderada) de água aplicada nas parcelas foi de 36,37 L planta<sup>-1</sup>, enquanto em BS a média foi de 30,74 L planta<sup>-1</sup>. O volume de água evapotranspirada ou consumida (H<sub>2</sub>O aplicado – H<sub>2</sub>O drenado) entre os tratamentos, também apresentou uma grande variação. Em AS, as plantas consumiram 63,5% da água aplicada, já para BS esse consumo foi de 75,1%.

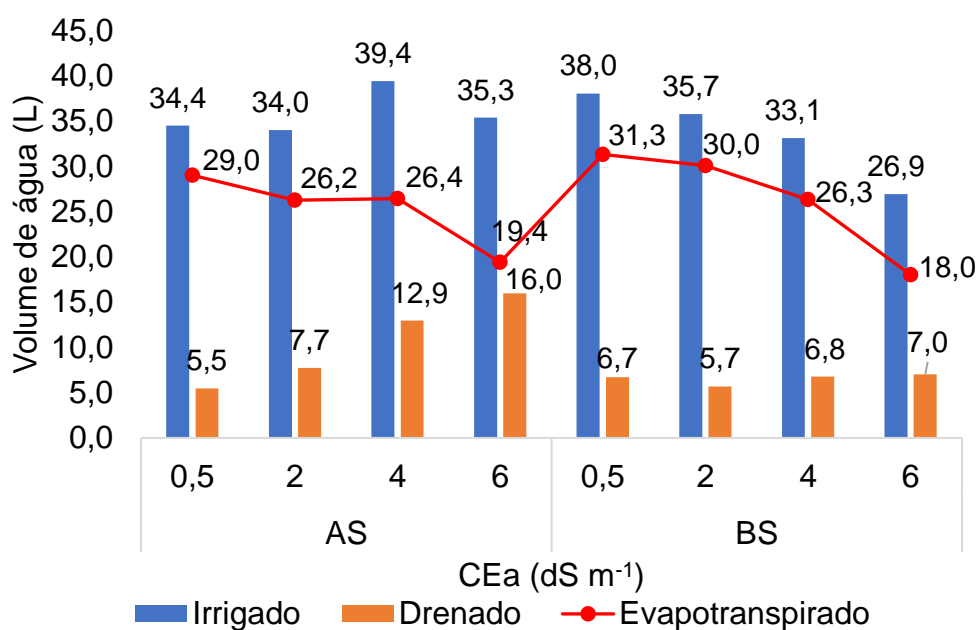
Considerando que para o milho a população pode variar de 40 mil a 70 mil plantas por hectares (EMBRAPA, 2002), a economia de água de BS em relação à AS seria no mínimo de 225 mil litros por hectare durante o ciclo da cultura. Salienta-se que esses valores foram calculados com base em resultados obtidos em ambiente protegido (casa de vegetação). Desta forma, para cultivo em campo aberto os valores podem ser divergentes.

De acordo com D’Odorico *et al.* (2020), estabelecer o quanto vale a água usado na agricultura é complexo pois depende da região onde está inserido a área agrícola e da cultura que será irrigada. Assim, diferentes culturas podem apresentar grandes variações de valores pelo mesmo volume de água. Essas diferenças são o resultado do efeito combinado das diferenças nos preços da safra e da EUA da safra.

Em 2020, o valor médio global da água para o milho por exemplo foi de US\$ 0,16 m<sup>3</sup>, enquanto para o trigo esse valor foi de apenas US\$ 0,05 m<sup>3</sup> (D'ODORICO *et al.*, 2020).

Na Figura 5 pode-se verificar as quantidades de água aplicada, drenada e evapotranspirada em função do método de determinação da FL e CE<sub>a</sub>, durante os 80 dias de irrigação do milho. O consumo de água (linha vermelha) foi maior quando as plantas foram irrigadas com água de baixa salinidade (CE<sub>a</sub> = 0,5 dS m<sup>-1</sup>). Esse consumo caiu à medida que a salinidade da água aumentou, independente do método adotado para se determinar a FL.

Figura 5 – Quantidade de água aplicada, drenada e evapotranspirada na cultura do milho submetido a diferentes métodos de determinação da FL e diferentes CE da água de irrigação



AS: fração de lixiviação calculado de acordo com fórmula proposta por Rhoades; BS: fração de lixiviação determinado a partir do balanço hídrico + 15% de FL.

O consumo médio de água quando se irrigou o milho com a água de baixa salinidade foi na ordem de 30 L planta<sup>-1</sup>. Porém, esse consumo caiu para 18,7 L planta<sup>-1</sup> quando se utilizou a água mais salina (CE<sub>a</sub> = 6 dSm<sup>-1</sup>). Essa redução deve-se as condições adversas (osmótica, toxicidade iônica e desbalanço nutricional) que as altas concentrações de sais submetem as plantas (MUNNS e TESTER, 2008; FAROOQ *et al.*, 2015).

Resultados semelhantes foram obtidos por Garcia *et al.* (2007a) e Lacerda *et al.* (2016). Em ambos os estudos, os autores constataram que quando o milho foi submetido a ambientes com maiores concentrações de sais, as plantas consumiram menos água, desenvolveram-se menos e apresentaram um decréscimo da EUA.

As investigações de métodos que visem aumentar a EUA são justificadas por González-Romero e Rubio (1993). Segundo os autores, o incremento de 10% da EUA na agricultura corresponderia a uma poupança equivalente ao volume de água consumido em todo o mundo no uso urbano. Diante disso, o método de determinação da FL com base no balanço hídrico + 15% de FL (BS) apresentou-se como meio mais viável para o manejo de água salina.

### **Quantidades de elementos químicos no lixiviado**

A análise da composição química da água drenada é uma importante variável para avaliar diretamente as perdas de nutrientes por lixiviação e indiretamente para verificar o acúmulo de sais no solo. Com exceção da relação Na/K e  $\text{NO}_3/\text{Cl}^-$ , todas as variáveis estudadas apresentaram diferença estatística significativa ao nível de 1% de significância para os métodos de determinação da FL, conforme observado na Tabela 2, com maiores valores no método AS. Também se observou interação significativa entre salinidade x método de determinação da FL, excetos para os totais de P e para as relações Na/K e  $\text{NO}_3/\text{Cl}^-$ .



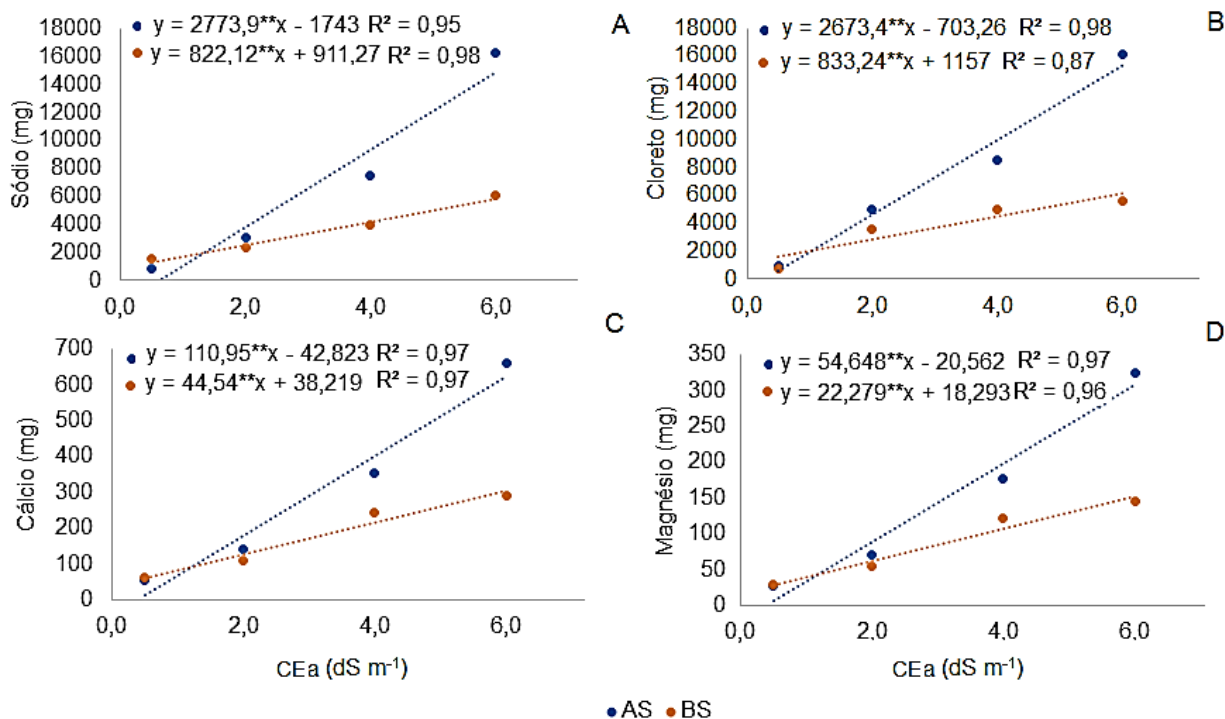
Tabela 2 – Resumo da análise de variância com os valores F calculado para os valores totais de sódio (Na), cloreto (Cl<sup>-</sup>), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), nitrato (NO<sub>3</sub>), fósforo (P), potássio (K), relação Na/K e NO<sub>3</sub>/Cl analisados no lixiviado, em função da salinidade da água de irrigação e da fração de lixiviação (FL)

FV	Valores de F calculado								
	Na	Cl <sup>-</sup>	Ca	Mg	NO <sub>3</sub>	P	K	Na/K	NO <sub>3</sub> /Cl <sup>-</sup>
FL (A)	70,31**	188,12**	46,79**	47,33**	12,69**	17,39**	38,33**	1,12ns	0,68ns
Sal. (B)	137,93**	103,82**	125,44**	118,38**	37,67**	2,24ns	57,55**	1,99ns	13,78**
AxB	42,05**	55,35**	25,58**	23,39**	8,60**	2,18ns	21,17**	1,97ns	0,92ns
CV <sub>1</sub> (%)	27,62	14,09	26,62	26,35	58,80	73,64	40,11	51,24	65,74
CV <sub>2</sub> (%)	24,99	16,6	24,09	24,77	53,35	75,77	34,06	34,05	58,94
	-----mg-----							--	--
Média AS	6925,4 a	7651,2 a	303,89 a	150,21 a	7,28 a	0,07 a	224,04 a	29,17	0,0008
Média BS	3480,4 b	3760,8 b	177,41 b	87,91 b	4,29 b	0,03 b	105,82 b	34,13	0,0009

FV – Fonte de variação, Sal. – Salinidade da água, FL – Fração de lixiviação, CV – coeficiente de variação, <sup>ns</sup> e <sup>\*\*</sup> Não significativo e significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F, respectivamente. AS: fração de lixiviação calculada de acordo com fórmula proposta por Rhoades; BS: fração de lixiviação determinado a partir do balanço hídrico + 15% de FL.

Na Figura 6, verifica-se que os elementos que foram utilizados para a composição salina da água (sódio, cloro, cálcio e magnésio) apresentaram exatamente o mesmo padrão de resposta. Para simular a composição de sais presentes numa água salina, utilizou-se as proporções equivalentes 7:2:1, respectivamente, para o cloreto de sódio, cloreto de cálcio e cloreto de magnésio. Desta forma, de acordo com Rhoades, Kandiah e Marshali (2000) os tratamentos que recebem água com CE mais elevada, conseqüentemente, receberam os maiores aportes desses elementos durante o experimento.

Figura 6 – Curvas de regressão do sódio (A), cloreto (B), cálcio (C) e magnésio (D) acumulado no lixiviado para diferentes métodos de determinação da FL e diferentes CE da água de irrigação



AS: fração de lixiviação calculado de acordo com fórmula proposta por Rhoades; BS: fração de lixiviação determinado a partir do balanço hídrico + 15% de FL. “\*\*\*” significativo a nível de 1% de probabilidade pelo Teste F.

As respostas para as quantidades médias acumuladas de Na, Cl<sup>-</sup>, Ca e Mg no lixiviado apresentaram-se como regressão linear diretamente proporcional ao aumento da CE<sub>a</sub> ( $R^2 \geq 0,95$ ). O mesmo padrão de inclinação das retas para esses elementos também foi constatado para os métodos de determinação da FL, onde os coeficientes angulares de AS foram maiores que os de BS. E, com exceção do Na lixiviado, o ponto de interseção das retas ocorreram quando a CE<sub>a</sub> foi de 1,2 dS m<sup>-1</sup>.

Esses resultados aparentemente mostram que os totais lixiviados guardam estreita relação com os volumes de água lixiviados.

Os valores médios encontrados de Na, Ca e Mg no lixiviado de AS e BS indicam incrementos na diferença entre as médias ao passo que a  $CE_a$  aumentou, com diferenças expressivas no coeficiente angular da reta. No caso do cloreto do lixiviado, as médias diferiram a partir da  $CE_a$  de  $2 \text{ dS m}^{-1}$  (AS = 4643,54 mg de  $Cl^-$  e BS = 2823,48 mg de  $Cl^-$ ). Para todos os elementos supracitados, observou-se diferença estatística a nível de 1% de significância para os métodos de determinação da FL. Em geral, as médias acumuladas no lixiviado desses elementos foram superiores no método proposto por Rhoades (AS).

As maiores diferença entre as médias dos elementos no lixiviado ocorreram no cloreto e no sódio, onde os valores de AS ( $Cl^- = 7651,2 \text{ mg}$  e Na = 6925,46 mg) foram aproximadamente o dobro dos encontrados em BS ( $Cl^- = 3760,2 \text{ mg}$  e Na = 3480,39 mg). Para os demais elementos apresentados na Figura 6, a diferença entre as médias de AS para BS foram entorno de 40%, conforme pode-se observar na Tabela 2. Esses resultados mostraram que, a lixiviação de um elemento não depende apenas do volume de água aplicado. As próprias características físicos e químicas dos elementos influenciam no maior ou menor deslocamento dentro do solo (EMBRAPA, 2011)

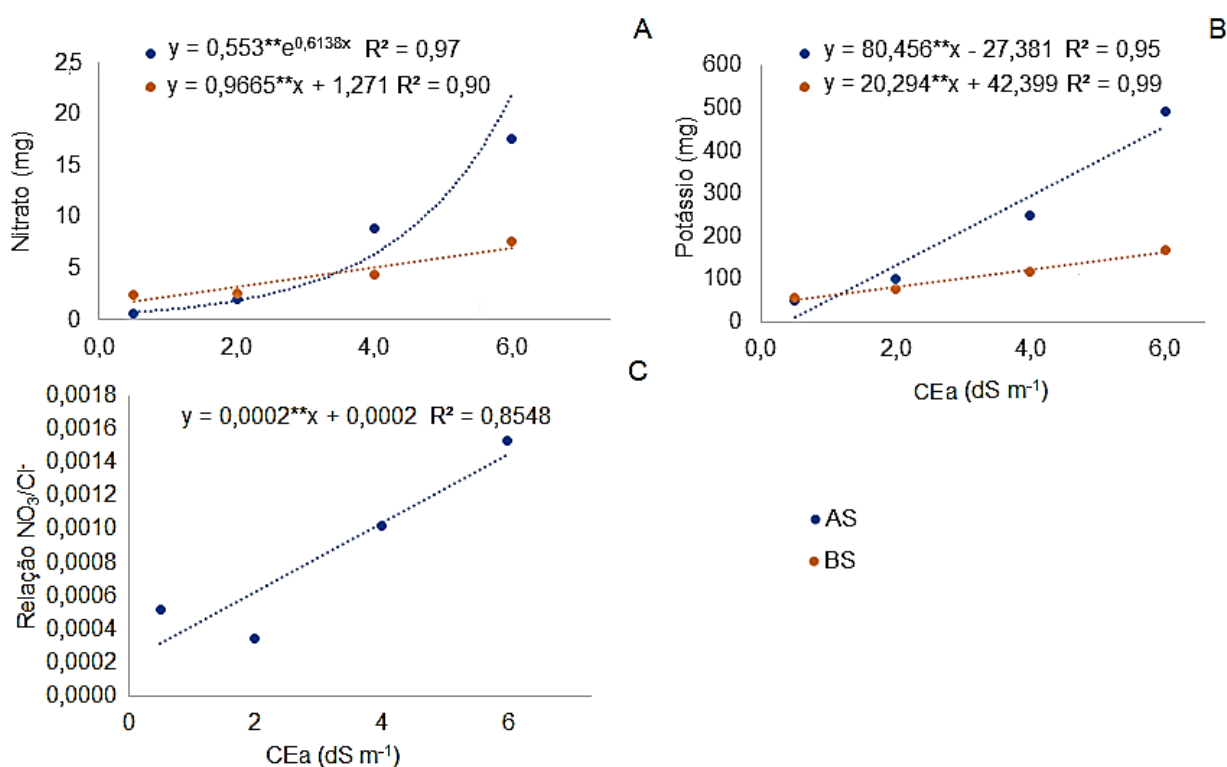
Em relação ao cálcio e ao magnésio, apesar de serem considerados como elementos essenciais, em excesso, esses nutrientes podem interferir na disponibilidade de micronutrientes, tais como ferro e cobre (NOVAIS *et al.*, 2007). Altas concentrações de Ca e Mg na água, contribui para a elevação da “dureza da água”, que pode provocar prejuízos aos sistemas de irrigação (BERNARDO *et al.*, 2019). Em adição, assim como o sódio, o cálcio e o magnésio são elementos que contribuem para a elevação do pH do solo (abordado no capítulo 3). Desta forma, a manutenção do pH do solo em faixas alcalinas, promove o desbalanço iônico no solo e na planta (FERREIRA, SILVA e RUIZ, 2016).

O intuito da aplicação da fração de lixiviação é justamente a remoção dos sais da zona radicular das plantas. Esses sais são solubilizados em água e transportados dentro do perfil de solo. Dessa forma, o maior volume de água empregado no método proposto por Rhoades (AS), contribuiu para a maior lixiviação dos sais no solo. Esse fato contribuiu, por exemplo, para uma menor concentração de sódio e cloro nas folhas do milho do tratamento AS (TABELA 1). Entretanto, verificou-

se que o decréscimo do K foliar também foi mais acentuado nesse tratamento, possivelmente em função das maiores perdas desse nutriente por lixiviação.

O aumento da quantidade de água usado para lixiviar os íons tóxicos aos vegetais (como sódio e cloro), também pode remover nutrientes importantes para as plantas, tais como o nitrogênio e o potássio (HENG *et al.*, 1991; SHENKER, BEN-GAL e SHANI, 2003; RISTVEY, LEA-COX e ROSS, 2004; LACERDA *et al.*, 2016; LACERDA *et al.*, 2018). A análise da concentração foliar de potássio, bem como da quantidade de nitrato e de potássio lixiviado durante o experimento (TABELA 2, FIGURAS 7A e 7B), apontam que a FL também promoveu grandes perdas de nutrientes do solo.

Figura 7 – Curvas de regressão do nitrato (A), potássio (B) e relação  $\text{NO}_3/\text{Cl}^-$  (C) acumulados no lixiviado para diferentes métodos de determinação da FL e diferentes CE da água de irrigação



AS: fração de lixiviação calculado de acordo com fórmula proposta por Rhoades; BS: fração de lixiviação determinado a partir do balanço hídrico + 15% de FL. “\*\*\*” significativo a nível de 1% de probabilidade pelo Teste F.

As curvas resposta do nitrato ( $\text{NO}_3$ ) do lixiviado, mostraram diferenças significativas ( $p < 0,01$ ) tanto em relação ao método de determinação da FL, quanto pela interação entre a salinidade da água de irrigação e as FL adotadas. Para AS, o

modelo de regressão mais adequado foi do tipo exponencial ( $R^2 = 0,97$ ), enquanto para BS, o modelo de melhor ajuste foi o linear ( $R^2 = 90\%$ ), conforme Figura 7A.

As diferenças entre as médias de  $\text{NO}_3$  entre os métodos de determinação da FL foi observada a partir da  $\text{CE}_a$  de  $4 \text{ dS m}^{-1}$ , sendo que a média de BS (5,14 mg) foi 20% menor que a de AS (6,44 mg). O aumento da  $\text{CE}_a$  provocou maior diferença entre os valores de nitrato no lixiviado entre os tratamentos, chegando a triplicar a quantidade de  $\text{NO}_3$  em AS (22 mg) em relação aos valores encontrados em BS (7,1 mg), para uma  $\text{CE}_a$  de  $6 \text{ dS m}^{-1}$ .

O nitrogênio aplicado na forma de ureia é o amídico ( $\text{NH}_2$ ) (NOVAIS *et al.*, 2007). Entretanto, esse nitrogênio amídico pode ser rapidamente reduzido para a forma de nitrato ( $\text{NO}_3$ ) pela microbiota do solo. Essa transformação aumenta a solubilidade do nitrogênio (BREDEMEIER e MUNDSTOCK, 2000) e, por esse motivo, a lixiviação do N na forma de nitrato é um dos principais meios de perda desse elemento (RIBEIRO *et al.*, 2020). Essas perdas podem ser mais acentuadas quando as plantas se encontram em situação de estresse salino.

Diversos estudos (SHENKER, BEM-GAL e SHANI, 2003; NEVES, *et al.*, 2009; LARCEDA *et al.*, 2016) apontaram que o menor aproveitamento do N nessas condições, deve-se a menor capacidade das plantas em extrair nutrientes quando submetidas ao estresse salino e ao efeito antagônico provocado pelo cloro. Em ambientes com altas concentrações de sais, o cloro, na forma de cloreto, é o ânion mais abundante. Esse caso pode ser observado na Tabela 2 onde a quantidade de cloreto supera todos os elementos analisados no lixiviado.

Na Figura 7C, observa-se que a relação  $\text{NO}_3/\text{Cl}^-$  aumenta com o incremento da salinidade da água de irrigação. Ou seja, o aumento da salinidade da água provocou o aumento da lixiviação de nitrogênio na forma de nitrato. Esse resultado reflete o que foi constatado no tecido foliar do milho. A relação  $\text{NO}_3/\text{Cl}^-$  foliar foi inversamente proporcional ao aumento da CE da água usada na irrigação (FIGURA 3E). Porém, diferentemente dos dados nas folhas, a relação  $\text{NO}_3/\text{Cl}^-$  no lixiviado não variou com os métodos de determinação da FL, aumentando apenas em função do incremento da salinidade.

Shenker, Ben-Gal e Shani (2003) explanaram sobre os efeitos antagonistas entre os íons de  $\text{NO}_3$  e  $\text{Cl}^-$ . De acordo com os autores, estes competem pelos mesmos sítios de transporte dentro da planta. Além do antagonismo verificado na planta, Larcera *et al.* (2018) verificaram que o excesso de cloreto no solo diminui a

disponibilidade de  $\text{NO}_3$ . De fato, a semelhança de cargas desses elementos os torna competidores pelos sítios de ligações coloidais do solo (TROEH e THOMPSON, 2007; BRADY e WEIL, 2013). O cloreto, em quantidades superiores ao nitrato em ambiente salino, satura os sítios de ligações da fase sólida do solo, deixando assim, o nitrato submetido a lixiviação.

As quantidades acumuladas de fósforo no lixiviados foram baixas, apresentando diferença estatística significativa ( $p < 0,01$ ) apenas para os métodos de determinação da FL (TABELA 2). Em média, AS apresentou 0,07 mg de P perdido por lixiviação que, apesar de baixo quando comparado a lixiviação de outros elementos, ainda foi mais que o dobro de P encontrado em BS (0,03 mg). A forte adsorção à matriz do solo é uma característica desse nutriente, com a consequente baixa mobilidade, além da grande possibilidade de precipitação na forma de fosfato (HAYNES, 1985; EMBRAPA, 2011; ROY *et al.*, 2016).

Trabalhos mostram que quando aplicado na forma sólida na superfície do solo – como realizado nesse experimento – o fósforo não se move mais que 3 cm no solo (ROLSTON *et al.*, 1979; EMBRAPA, 2011). Devido a isso, as perdas de P por lixiviação são consideradas baixas. Esse é um dos principais motivos que se recomenda a adubação fosfatada em uma única parcela, em fundação, nas culturas anuais (EMBRAPA, 2006).

O potássio por sua vez, apresenta maior solubilidade em água quando comparado ao fósforo. Essa característica torna o elemento mais susceptível à lixiviação, especialmente quando se utiliza elevadas frações de lixiviação em ambientes de estresse salino. Tanto para a FL calculada pela fórmula proposta por Rhoades (AS), quanto para o método do balanço hídrico + 15% de FL (BS), as perdas de K por lixiviação foram maiores quando irrigados com água mais salina. As respostas do nutriente para cada método de determinação da FL seguiram o padrão de regressão linear diretamente proporcional ao aumento da  $\text{CE}_a$  (FIGURA 7B).

Na Tabela 2 e na Figura 7B, verifica-se que as maiores perdas de K por lixiviação ocorreram em AS. Em média, as perdas de K por lixiviação em AS (224,04 mg) foi duas vezes maior que em BS (105,82 mg). Assim como já explanado em outros elementos, o maior volume de água utilizado pelo método de Rhoades para a lixiviação dos sais é responsável pela maior solubilização e transporte do K (MENDES *et al.*, 2016). Porém, é importante apontar que o nitrogênio e o potássio, independente do método utilizado para calcular a FL, apresentaram maiores perdas quando as

plantas de milho foram irrigadas com água mais salina. Em média, o total de N lixiviado quando se utilizou uma água de  $CE = 0,5 \text{ dS m}^{-1}$  para a irrigação, foi de 1,75 mg, contra 14,52 mg para uma  $CE_a$  de  $6 \text{ dS m}^{-1}$ . Ou seja, uma perda de N superior a 8 vezes na situação de maior estresse salino. No caso do potássio, a diferença foi ainda maior. As perdas de K quando se utilizou água de  $CE = 0,5 \text{ dS m}^{-1}$  (32,7 mg), foi apenas 10,5% das perdas verificadas quando se irrigou com água de  $6 \text{ dS m}^{-1}$  (309,76mg).

Trabalhos realizados por Larceda *et al.* (2016) revelaram que as plantas de milho sob estresse salino tiveram melhor eficiência do uso de insumos (água, fertilizantes nitrogenados e potássicos) quando a adubação foi reduzida de acordo com a redução da evapotranspiração da cultura. Os mesmos autores, em estudo complementar, mostraram acúmulo de  $\text{NO}_3$  e K em camadas mais profundas do solo cultivado com milho.

A salinidade elevada contribui para a redução do poder da planta de extrair nutrientes do solo, notadamente aqueles requeridos em maiores quantidades pelos vegetais, como o nitrogênio e o potássio (SHENKER, BEM-GAL e SHANI, 2003; NEVES *et al.*, 2009; LARCEDA *et al.*, 2016). Essas perdas são maiores à medida que se utiliza maiores FL sem que, necessariamente, os benefícios da redução de sais na zona radicular sejam refletidos no crescimento e produção do vegetal, conforme observado no capítulo 1.

## CONCLUSÃO

Os menores volumes de água aplicados baseando-se pelo método do balanço hídrico + 15% de FL (BS) promoveu maior acúmulo de elementos químicos na folha do milho. Em contrapartida, os volumes superiores de água utilizados nos tratamentos em que a FL foi determinada por Rhoades, contribuíram para a maior lixiviação dos elementos químicos e, conseqüentemente, menores teores destes no tecido foliar da planta.

Independente do método de determinação da FL, o aumento da salinidade da água interferiu na absorção de nitrogênio, fósforo e potássio pela planta. Verificou-se um decréscimo das concentrações foliares desses nutrientes em função do incremento de  $CE_a$ . Entretanto, a presença desses nutrientes aumentou no lixiviado à medida que aplicou-se águas mais salinas nas plantas.

Os grandes volumes de água aplicado para lixiviar os sais quando se irrigou com  $CE_a$  maior ou igual  $4 \text{ dS m}^{-1}$ , contribuiu para a baixa EUA no método de Rhoades. Dessa forma, mesmo com a queda no crescimento e produção que a salinidade provoca no milho, os valores constantes da fração de lixiviação no método do balanço hídrico + 15% da FL, favoreceu para maior economia de água e, conseqüentemente, maior EUA. Diante disso, o método do balanço hídrico + 15% de FL mostrou-se como o mais vantajoso.



## REFERÊNCIAS

AOAC. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 18. ed. Maryland: AOAC, 2005.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **Water quality for agriculture**. FAO Irrigation and Drainage Paper 29. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985. 174 p.

AZEVEDO NETO, A. D.; TABOSA, J. N. Estresse salino em plântulas de milho: parte II. Distribuição dos macronutrientes catiônicos e suas relações com sódio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, p.165-171, 2000.

BAETHGEN, W. E.; ALLEY, M. M. A manual colorimetric procedure for measuring ammonium nitrogen in soil and plant Kjeldahl digests. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v.20, p.961-969, 1989.

BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D.; SOARES, A. A. **Manual de irrigação**. 9 ed, Viçosa: Editora UFV, 2019, 545 p. il.

BHATLA S. C.; LAL, M. A. **Plant physiology, development and metabolism**. Singapore: Springer Nature Singapore Pte. Ltd, 2018, 1271 p.

BIGUELINI, C. P.; GUMY, M. P. Saúde ambiental: índices de nitrato em águas subterrâneas de poços profundos na região sudoeste do Paraná. **Revista Faz Ciência**, Francisco Beltrão, v. 14, n.20, p. 153-75, 2012.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 704p.

BRAGA, J.M.; DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica do fósforo com extrato de solos e plantas. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 41, p. 73-85, 1974.

BRAZ, R. S.; LACERDA, C. F.; ASSIS JUNIOR, R. N.; FERREIRA, J. F. S.; OLIVEIRA, A. C.; RIBEIRO, A. A. Growth and physiology of maize under water salinity and nitrogen fertilization in two soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.23, n.12, p.907-913, 2019.

BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C. M. Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, p.365-372, 2000.

CATALDO, D. A.; HAROON, M.; SCHRADER, L. E.; YOUNGS, V. L. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v.6, p.71-80, 1975.

CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F.; MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizante. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.;

NEVES, J. C. L. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-537.

CHEN, W.; HE, Z. L.; YANG, X. E.; MISHA, S.; STOFFELLA, P. J. Chlorine nutrition of higher plants: progress and perspectives, **Journal of Plant Nutrition**, London, v. 33, n. 7, p. 943-952, 2010.

DIAS, N. S.; BLANCO, F. F.; SOUZA, E. R.; FERREIRA, J. F. S.; NETO, O. N. S.; QUEIROZ, I. S. R. Efeitos dos sais na planta e tolerância das culturas à salinidade. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. DA S.; LACERDA, C. F. DE; GOMES FILHO, E. (ed.) **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 2.ed. Fortaleza: INCTSal, 2016. Cap.11, p. 151-162.

D'ODORICO, P.; CHIARELLI, D. D.; ROSA, L.; BINI, A.; ZILBERMAN, D.; RULLI, M. C. The global value of water in agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 117, n. 36, p. 21985–21993, 2020.

EMBRAPA. **Cultivo do milho: plantio, espaçamento, densidade, quantidade de sementes**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado Técnico 46, 2002. Disponível em: [https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Comunicadotecnico46\\_000fh4typ3g02wyiv80rn0etns9yxeif.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Comunicadotecnico46_000fh4typ3g02wyiv80rn0etns9yxeif.pdf). Acesso em: 20 jan. 2021.

EMBRAPA. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2011, 771 p. il.

EMBRAPA. **Manual de análises de Solo**. 3. ed. revisado e ampliado – Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

EMBRAPA. **Nutrição e adubação do milho**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica 78, 2006. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/490410>. Acesso em: 22 nov. 2017.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solo**. 5. ed. Brasília, DF: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2018. 356 p. il.

FALKENMARK, M.; ROCKSTRÖM, J. **Balancing water for humans and nature: the new approach in ecohydrology**. Sterling, VA: Earthscan, 2004, 247 p.

FAROOQ, M.; HUSSAIN, M.; WAKEEL, A.; SIDDIQUE, K. H. M. Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, [s. l.], v. 35, p. 461–481, 2015.

FEIJÃO, A. R.; MARQUES, E. C.; SILVA, J. C. B.; LACERDA, C. F.; PRISCO, J. T.; GOMES-FILHO, E. Nitrato modula os teores de cloreto e compostos nitrogenados

em plantas de milho submetidas à salinidade. **Bragantia**, Campinas, v. 72, p. 10-19, 2013.

FERREIRA, A. C. B.; ARAÚJO, G. A. A.; PEREIRA, P. R. G.; CARDOSO, A. A. Características agronômicas e nutricionais do milho adubado com nitrogênio, molibdênio e zinco. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, p. 131-138, 2001.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

GAINES, T. P.; PAKER, M. B.; GASCHO, G. J. Automated determination of chorides in soil and plant tissue by sodium nitrate extration. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 76, n.3, p. 371-374, 1984.

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

GARCIA, G. O.; FERREIRA, P. A.; MIRANDA, G. V.; OLIVEIRA, F. G.; SANTOS, D. B. Índices fisiológicos, crescimento e produção do milho irrigado com água salina. **Irriga**, Jaboticabal, v. 12, n. 3, p. 307-325, 2007a.

GONZÁLEZ-ROMERO, A.; RUBIO, S. El problema de la planificación hidrológica: una aplicación al caso español. **Revista de Economía Aplicada**, Zaragoza, v. 1, p. 33-66, 1993.

HAYNES, R. J. Principles of fertilizer use for trickle irrigated crops. **Fertilizer Research**, [s. l.], v.6, n.3, p. 235-255, 1985.

HENG, L. K.; WHITE, R. E.; BOLAN, N. S.; SCOTTER, D. R. Leaching losses of major nutrients from a mole-drained soil under pasture. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, [s. l.], v. 34, n. 3, p. 325-334, 1991. DOI: 10.1080/00288233.1991.10417672

JONES JR., J. B .; WOLF, B.; MILLS, H.A. **Plant analysis handbook: a practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide**. Athens: Micro-Macro, 1991. 213 p.

LACERDA, C.F.; CAMBRAIA, J.; CANO, M.A.O.; RUIZ, H.A.; PRISCO, J.T. Solute accumulation and distribution during shoot and leaf development in two sorghum genotypes under salt stress. **Environmental and Experimental Botany**, v.49, n.2, p.107-20, 2003.

LACERDA, C. F.; FERREIRA, J. F. S.; LIU, X.; SUAREZ, D. L. Evapotranspiration as a criterion to estimate nitrogen requirement of maize under salt stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.202, p.192-202, 2016.

LACERDA, C. F.; FERREIRA, J. F. S.; SUAREZ, D. L.; FREITAS, E. D.; LIU, X. Evidence of nitrogen and potassium losses in soil columns cultivated with maize

under salt stress. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 8, p. 553-557, 2018.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MENDES, W. C.; ALVES JÚNIOR, A.; CUNHA, P. C. R.; SILVA, A. R.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D. Potassium leaching in different soils as a function of irrigation depths. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.20, n.11, p.972-977, 2016.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, [s. l.], v. 59, p. 651-668, 2008.

NEVES, A. L. R., LACERDA, C. F.; GUIMARÃES, F. V. A.; HERNANDEZ, F. F. F.; SILVA, F. B.; PRISCO, J. T.; GHEYI, H. R. Acumulação de biomassa e extração de nutrientes por plantas de feijão-de-corda irrigadas com água salina em diferentes estádios de desenvolvimento. **Ciencia Rural**, v.39, p.758-765, 2009.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-537.

OWEN JR, J. S.; WARREN, S. L.; BILDERBACK, T. E.; ALBANO, J. P. Phosphorus rate, leaching fraction, and substrate influence on influent quantity, effluent nutrient content, and response of a containerized woody ornamental crop. **Hortscience**, v. 43, n. 3, p. 906–912, 2008.

RHOADES, J. D. Drainage for salinity control. *In*: VAN SCHILFGAARDE, J. (Ed.), **Drainage for Agriculture**. Agronomy Monograph No. 17. SSSA, Madison, 1974. p. 433–461.

RHOADES, J. D.; KANDIAH, A. M.; MARSHALI, A. M. **Uso de águas salinas para produção agrícola**. Campina Grande: UFPB. 2000. 117 p.

RIBEIRO, A. A.; LACERDA, C. F.; NEVES, A. L. R.; SOUSA, C. H. C.; BRAZ, R. S.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, J. M. G.; FERREIRA, J. F. S. Uses and losses of nitrogen by maize and cotton plants under salt stress. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 66, p. 1-14, 2020. DOI: 10.1080/03650340.2020.1779228.

RISTVEY, A. G.; LEA-COX, J. D.; ROSS, S. D. Nutrient uptake, partitioning and leaching losses from container-nursery production systems. **Acta Horticulturae**, 630, p. 321–328, 2004.

ROLSTON, D. E.; SCHULBACH, R. S.; PHENE, C. J.; MILLER, R. J.; URIU, K.; CARLSON, R. M.; HANDERSON, D. W. **Applying nutrients and other chemicals to trickle irrigated crops**. Berkeley: University of California, 1979, 14p.

ROY, E. D; RICHARDS, P. D.; MARTINELLI, L. A.; COLETTA, L.D.; LINS, S. R. M.; VAZQUEZ, F. F.; WILLING, E.; SPERA, S. A.; VANWEY, L. K.; PORDER, S. The

phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants**, v. 2, p. 16043, 2016.

ROY, E.D.; WILLIG, E.; RICHARDS, P.D.; MARTINELLI, L.A.; VAZQUEZ, F.F.; PEGORINI, L.; SPERA, S.A.; PORDER, S. Soil phosphorus sorption capacity after three decades of intensive fertilization in Mato Grosso, Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 249, p. 206-214, 2017.

SANTOS, R. D.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7. ed. revista e ampliada. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015, 101 p.

SHENKER, M.; BEN-GAL, A.; SHANI, U. Sweet corn response to combined nitrogen and salinity environmental stresses. **Plant Soil**, v.256, p.139-147, 2003.

SINCLAIR, T.R.; TANNER, C. B.; BENNETT, J. M. Water-use efficiency in crop production. **BioScience**, v. 34, n. 1, p. 36-40, 1984.

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**, Campina Grande, v.14, p.705-714, 2010.

SOUZA, L. S. B.; MOURA, M. S. B.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, T. G. F. Eficiência do uso da água das culturas do milho e do feijão-caupi sob sistemas de plantio exclusivo e consorciado no semiárido brasileiro. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 3, p.715-721, 2011.

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

TROEH, F. R.; THOMPSON, L. M. **Solos e fertilidade do solo**. 6.ed. São Paulo: Andrei, 2007. 718 p. il.

## 4 IMPACTOS DE FRAÇÕES DE LIXIVIAÇÃO NA DINÂMICA DOS ELEMENTOS QUÍMICOS EM COLUNAS DE SOLO CULTIVADAS COM MILHO IRRIGADO COM ÁGUAS SALINAS

### RESUMO

A dinâmica dos elementos químicos na relação solo-água-plantas é um fenômeno bastante complexo e dependente de vários fatores bióticos e abióticos. As atividades antrópicas podem alterar profundamente essa dinâmica, principalmente com a prática da irrigação com água salina. Nesse contexto, foi testado nesse trabalho a hipótese de que diferentes salinidades da água de irrigação e diferentes frações de lixiviação (FL) alteram a concentração dos elementos químicos dentro do perfil de solo. Desta forma, objetivou-se analisar a dinâmica desses elementos em três camadas em colunas de solo cultivadas com milho sob diferentes salinidades da água de irrigação e FL adotadas. O experimento foi instalado na área da Estação Meteorológica da Universidade Federal do Ceará, *campus* do Pici, Fortaleza – CE, em delineamento inteiramente casualizado, composto por 2 formas de determinação da FL, 4 níveis de salinidade da água de irrigação –  $CE_a$  (0,5, 2,0, 4,0 e 6,0  $dS\ m^{-1}$ ), 3 profundidades de solo (0 – 20, 21 – 60, 61 – 90 cm) e 7 repetições. As FL foram determinadas por dois métodos: AS - Aplicação da FL calculada de acordo com a fórmula proposta por Rhoades; BS - Aplicação de uma FL de 15% calculada a partir do balanço hídrico do solo das parcelas experimentais. Foram avaliadas nas 3 camadas do solo o pH,  $CE_{es}$ , N, K, P, Ca, Mg, Na e  $Cl^-$ . O pH do solo variou em profundidade, saindo da faixa neutra na camada superficial para faixa ácida na última camada. Verificou-se o aumento da  $CE_{es}$  em profundidade e, maiores médias nos tratamentos com níveis de sais mais elevados na água. As médias de Na, Mg e  $Cl^-$  aumentaram em profundidade, bem como observou-se o aumento dos níveis desses íons à medida que se aplicava água com maior CE. Constatou-se menores teores de N e K no tratamento AS. Sendo que, em BS os valores de N do solo foram maiores com o aumento da  $CE_a$  enquanto o oposto ocorreu em AS. À medida que se aumentou a  $CE_a$ , o K foi translocado da primeira camada para última camada do solo. Mais de 85% do fósforo do solo foi encontrado na primeira camada do solo. Nesse caso, constata-se que as características de solubilidade e mobilidade de alguns elementos químicos podem ser mais relevantes na sua persistência no solo do que os métodos de determinação da FL

**Palavras-chave:** Irrigação. Salinidade do solo. Teores de nutrientes. Lixiviação de sais. Condutividade elétrica.

## **IMPACTS OF LEACHING FRACTIONS ON DYNAMIC OF CHEMICAL ELEMENTS IN SOIL COLUMNS CULTIVATED WITH MAIZE AND IRRIGATED WITH SALINE WATER**

### **ABSTRACT**

The dynamic of chemical elements in the soil-water-plant relationship is a very complex phenomenon and depends on several biotic and abiotic factors. Human activities can profoundly alter this dynamic, especially with the practice of irrigation with saline water. This chapter tested the hypothesis that different salinity of irrigation water and different leaching fractions (LF) alter the concentration of chemical elements within the soil profile. Thus, aimed of this study was to analyze the dynamic of these elements in three layers of soil column cultivated with maize and submitted to different salinities of the irrigation water and different LF adopted. The experiment was installed in the area of the Meteorological Station of the Federal University of Ceara, Pici campus, Fortaleza - CE, in a completely randomized design, consisting of 2 methods of determining the leaching fraction (LF), 4 levels of irrigation water salinity –  $EC_w$  (0.5, 2.0, 4.0 and 6.0  $dS\ m^{-1}$ ), 3 layers of soil (0 - 20, 21 - 60, 61 - 90 cm) and 7 replications. The LF were determined by two methods: AS - LF application calculated according to the formula proposed by Rhoades; BS - Application of a 15% LF calculated from the soil water balance of the experimental plots. The pH,  $EC_{se}$ , N, K, P, Ca, Mg, Na and  $Cl^-$  were evaluated in the 3 layers of the soil. The soil pH varied in depth, from the neutral range in the superficial layer to acidic range in the last layer. There was an increase in  $EC_{se}$  in depth and higher averages in treatments with higher levels of salts in the water. The means of Na, Mg and  $Cl^-$  increased in depth, as well as an increase in the levels of these ions was observed as water with a higher EC was applied. Lower levels of N and K were found in the AS treatment. In BS, the soil N values were higher with the increase in  $EC_w$  while the opposite occurred in AS. While the  $EC_w$  was increased, K was translocated from the first layer to the last layer of the soil. Over 85% of the P concentration was found in the topsoil. In this case, it appears that the characteristics of solubility and mobility of some chemical elements may be more relevant in their persistence in the soil than the methods of determining LF.



**Keywords:** Irrigation. Soil salinity. Nutrient contents. Salt leaching. Electrical conductivity.

## INTRODUÇÃO

A prática da irrigação pode ser apontada como umas das técnicas que mais contribuiu para a expansão da agricultura no mundo (BERNARDO *et al.*, 2019). Essa técnica permitiu a produção agrícola em áreas com condições climáticas desfavoráveis e em solos com baixa capacidade de retenção de água. Entretanto, o uso de água salina na irrigação das lavouras pode provocar várias alterações de ordem química, física e biológica no solo (LACERDA *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2019).

Por tratar-se de um sistema aberto, o solo troca matéria e energia com o meio externo (OLIVEIRA, 2011). Desta forma, é um recurso natural em constantes mudanças. De acordo com Freire *et al.* (2015), a interação entre fertilidade do solo e salinidade é bastante complexa, pois além de causar significativas alterações fisiológicas e metabólicas nas plantas, a salinidade também altera os componentes químicos do solo. Em adição, a salinidade provoca um desbalanço iônico no meio, sendo que as interações sinérgicas ou antagônicas entre os minerais no solo são influenciadas pelo conteúdo iônico do mesmo (FREIRE *et al.*, 2012).

As mudanças no solo são tratadas na pedologia como processos pedogenéticos e são elas: adição, perda, translocação e transformação (OLIVEIRA, 2011). A água, seja oriunda da precipitação pluvial ou da prática da irrigação, tem papel fundamental na entrada (adição), transformação, distribuição (translocação) e percolação (perda) de solutos no solo (BRADY e WEIL, 2013). Segundo Martinez, Silva e Pereira (2016), a importância do estudo do transporte de solutos no solo deve-se ao fato de que a partir do conhecimento das propriedades e das interações das substâncias químicas com o meio, da sua movimentação e persistência no solo, é possível estabelecer as melhores práticas de manejo.

Sob condições naturais, a proporção de íons presentes no solo é fortemente influenciada pelo material de origem e pelo grau de atuação do clima, em especial a precipitação pluvial, que promove a perdas de íons por lixiviação (RIBEIRO, RIBEIRO FILHO e JACOMINE, 2016). Porém, a atividade agrícola pode promover intensas mudanças no solo, sobretudo, quando se pratica a irrigação com água salina.

No ambiente salino, a presença de sais solúveis na solução do solo promove a saturar a fase sólida do solo (e vice-versa) com elementos mais comuns na composição das águas salinas, em especial o sódio e o cloro (GHEYI *et al.*, 2016). Somado a isso, o aumento do pH em solos com altas concentrações de sódio trocável

diminui a solubilidade e disponibilidade de alguns micronutrientes (NOVAIS *et al.*, 2007; TROEH e THOMPSON, 2007; BRADY e WHEIL, 2013). O consumo de água e a absorção de elementos essenciais pelas plantas também sofrem redução quando estas são submetidas ao estresse salino (SHENKER, BEN-GAL e SHANI, 2003; LACERDA *et al.*, 2016). Desta forma, o uso de quantidades indicadas nas recomendações de adubação das culturas, podem não ser adequadas para as culturas nessas condições (LACERDA *et al.*, 2018).

Diante do exposto, objetivou-se com este estudo analisar a dinâmica dos elementos químicos em três diferentes camadas em colunas de solo cultivadas com milho submetido a dois métodos de determinação da fração de lixiviação e a diferentes salinidades da água de irrigação.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi instalado e conduzido no período de novembro de 2017 a fevereiro de 2018 em casa de vegetação na área da Estação Meteorológica da Universidade Federal do Ceará - UFC, *campus* do Pici, Fortaleza – Ceará. As coordenadas geográficas do local são 3° 45' S e 38° 33' W e altitude de 19 m. De acordo com a classificação de Köppen, a área do experimento está inserida em uma região de clima Aw', ou seja, tropical chuvoso, muito quente, com predomínio de chuvas nas estações do outono e do verão.

### Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado para o trabalho foi inteiramente casualizado (DIC). A composição dos tratamentos foi resultante da combinação da aplicação de 2 formas de determinar a fração de lixiviação, 4 níveis de salinidade da água de irrigação –  $CE_a$  (0,5, 2,0, 4,0 e 6,0 dS m<sup>-1</sup>), 3 profundidades do solo (0 – 20, 21 – 60 e 61 – 90 cm) e 7 repetições, totalizando 168 parcelas.

As frações de lixiviação (FL) foram definidas da seguinte forma: AS – Aplicação das frações de lixiviação calculada para cada nível de salinidade, de acordo com a fórmula proposta por Rhoades (1974); BS – Aplicação de frações de lixiviação de 15% calculada a partir do balanço hídrico do solo das parcelas experimentais. A composição dos tratamentos pode ser observada na Tabela 1 do capítulo 1.

Para o preparo das águas salinas foram adicionados à água do poço, cloreto de sódio (NaCl), cloreto de cálcio (CaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O) e cloreto de magnésio (MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O), na proporção equivalente a 7:2:1, obedecendo-se a relação entre  $CE_a$  e sua concentração (mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> = CE x 10), conforme Rhoades, Kandiah e Marshali (2000). Antes de cada irrigação a condutividade elétrica da água de cada tratamento era verificada por meio de condutímetro digital portátil.

## Coleta do solo e montagem das colunas

As parcelas experimentais foram compostas por uma coluna de solo cultivada com milho. Para a confecção das colunas de solo, utilizou-se tubos de PVC rígido com diâmetro interno de 20 cm e comprimento de 100 cm (FIGURA 1). As extremidades inferiores foram fechadas e vedadas com tampas de PVC (caps). A parede interna dos tubos recebeu uma camada de cola com areia para impedir o fluxo preferencial de água entre o solo e a parede do tubo. A extremidade basal da coluna foi preenchida com areia grossa até a altura de 5 cm para facilitar a drenagem.

Figura 1 – Imagem das colunas com os milhos aos 65 dias após a semeadura (A); Coluna de solo recém extraída do cano de PVC (B); Particionamento das camadas de solo (C).



Fonte: elaborado pelo Autor.

A coleta do solo usado no preenchimento das colunas foi realizada por meio de abertura de trincheira na área experimental pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará - UFC, Campus do Pici, Fortaleza – Ceará. O solo da área foi classificado como ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico Típico.

As delimitações dos horizontes foram feitas de acordo com a descrição morfológica do perfil, conforme Santos *et al.* (2015). A partir das marcações estabelecidas com base na espessura dos horizontes, procedeu-se as coletas das amostras de solo no intuito de simular, nas colunas, a mesma sequência dos horizontes encontrados “*in situ*”. Deste modo, amostras de cada horizonte do solo foram retiradas e peneiradas (em peneiras de malha de 2 mm) separadamente, para posterior montagem das colunas.

As colunas foram montadas obedecendo a mesma sequência dos horizontes dos solos. Porém, devido ao fato da espessura dos horizontes exceder o comprimento da coluna, foram definidas três camadas dentro do comprimento de 1 m de profundidade. Deste modo, realizou-se as seguintes divisões: primeira camada, material recolhido do horizonte A (0-20 cm); segunda, material recolhido nos horizontes E e EB (21-60 cm); terceira, material recolhido no horizonte B textural (61-90 cm).

Após a coleta do solo, amostras de cada horizonte foram utilizadas para caracterização dos atributos físicos e químicos: granulometria, densidade, umidade na capacidade de campo e ponto de murcha permanente, pH, condutividade elétrica do extrato de saturação, cátions trocáveis, CTC, teor de carbono orgânica, nitrogênio, fósforo de acordo com método descrito em Embrapa (2017). As caracterizações químicas e físicas do solo encontram-se, respectivamente, nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Caracterização química do solo utilizado no experimento

Prof. Cm	CE <sub>es</sub> dS m <sup>-1</sup>	pH	P mg kg <sup>-1</sup>	Ca	Mg	Na	K	H+Al	CO	N
ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico										
0 – 20	0,12	6,3	33	1,90	0,30	0,16	0,43	0,83	12,30	1,24
21 – 60	0,10	6,2	8	0,70	0,50	0,17	0,24	0,83	7,32	0,75
61 – 100	0,11	5,7	5	1,10	0,60	0,18	0,90	1,49	3,36	0,35

CE<sub>es</sub> – condutividade elétrica do extrato de saturação; pH – potencial hidrogeniônico; CO – carbono orgânico.

Tabela 2 – Caracterização física do solo utilizado no experimento

Prof. cm	Granulometria			Classe Textural	Densidade		Umidade		
	Areia	Silte	Argila		$\rho_s$	$\rho_p$	$\theta_{cc}$	$\theta_{pmp}$	$\theta_{CAD}$
	----- g kg <sup>-1</sup> -----				--g cm <sup>-3</sup> --	----- g 100g <sup>-1</sup> -----			
ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico									
0 – 20	825	107	68	Areia franca	1,47	2,69	7,26	5,05	2,21
21 – 60	845	85	70	Areia franca	1,46	2,74	6,18	3,51	2,67
61 – 100	527	157	316	Franco argilo arenosa	1,35	2,55	15,09	10,11	4,98

$\rho_s$  - densidade do solo;  $\rho_p$  - densidade de partículas;  $\theta_{cc}$  - capacidade de campo (umidade no potencial mátrico de 0,033 MPa);  $\theta_{pmp}$  - ponto de murcha permanente (umidade no potencial mátrico de 1,5 MPa).

### Semeadura e condução do experimento

A cultura utilizada no experimento foi o milho (*Zea mays* L.) híbrido BRS 2020. Cada coluna de solo recebeu quatro sementes de milho e, após sete dias da germinação, procedeu-se o desbaste deixando-se apenas uma planta por coluna. No dia seguinte ao desbaste, iniciou-se a aplicação da água salina de acordo com cada tratamento.

A adubação das plantas foi realizada de acordo com a recomendação da Embrapa (2006) para a cultura do milho. A adição do nitrogênio e do potássio foi parcelada, sendo 15% durante a semeadura, 25% fornecido 20 dias após a semeadura (DAS), 30% aos 35 DAS e os 30% restantes aos 50 DAS. O fósforo foi aplicado em única adubação, em fundação. Cada coluna recebeu 5,8 g de ureia, 8,3 g de superfosfato simples e 2 g de cloreto de potássio, respectivamente equivalentes a 200 kg de N ha<sup>-1</sup>, 120 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> e 90 kg de K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>.

Para determinar a necessidade hídrica da cultura, uma parcela de cada tratamento foi utilizada como lisímetro de drenagem. A irrigação do experimento era realizada com o auxílio de provetas a cada dois dias até os 30 DAS. Após esse período, as irrigações tornaram-se diárias até o encerramento do experimento. As aplicações das frações de lixiviação ocorriam a cada irrigação de acordo com cada tratamento. Para tal, levava-se em consideração o volume de água aplicada e o volume de água drenada do dia anterior de cada parcela.

### Variáveis analisadas

Ao final do experimento, realizou-se as análises químicas nas três diferentes camadas do Argissolo (0 – 20, 21 – 60 e 61 – 90 cm). Para tal, as amostras de solo foram secas ao ar e peneiradas em tamises de 2 mm, a fim de se obter a terra fina seca ao ar (TFSA). A partir da TFSA, as amostras foram particionadas para determinação de cada variáveis química proposta no estudo, de acordo com os métodos descritos em Embrapa (2017).

### ***Condutividade elétrica e pH do solo***

O potencial hidrogeniônico (pH) foi obtido por meio de eletrodo imerso em suspensão solo: líquido (H<sub>2</sub>O destilada), na relação 1:2,5. A condutividade elétrica (CE<sub>es</sub>) foi determinada no extrato da pasta de saturação e lido utilizando-se o condutímetro de mesa previamente calibrada com solução padrão de KCl a 0,01 mol L<sup>-1</sup> (146,9 μS cm<sup>-1</sup>). A pasta foi obtida pesando-se 300 g de TFSA em béqueres e adicionando-se água destilada até que o material atingisse o ponto de pasta de saturação (RICHARDS, 1954). Após o período de repouso (12 horas), o material foi submetido ao sistema de sucção à vácuo (funil de Büchner-Kitassato-bomba) para a aquisição dos extratos da pasta de saturação.

### ***Fósforo assimilável, potássio e sódio trocáveis***

O fósforo assimilável, o potássio e o sódio trocáveis foram extraídos com solução de Mehlich 1 (HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup> e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 mol L<sup>-1</sup>). Para leitura do fósforo, adicionou-se ao extrato uma solução ácida de molibdato de amônio e ácido ascórbico ocorrendo assim, a formação de complexo fosfomolibdico de cor azul após a redução do molibdato com ácido ascórbico. Posteriormente, realizou-se a leitura no espectrofotômetro a um comprimento de onda de 820 nm (EMBRAPA, 2017).

O potássio e o sódio foram lidos diretamente nos extratos ou devidamente diluídos em água destilada, quando necessário. As leituras desses elementos foram realizadas no fotômetro de chama.



### ***Cálcio e magnésio trocáveis***

Os cátions cálcio e magnésio trocáveis foram extraídos por cloreto de potássio ( $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$ ) e determinados por espectrofotometria de absorção atômica (AOAC, 2005).

### ***Nitrogênio e cloreto do solo***

Para a obtenção do nitrogênio total do solo, o N da matéria orgânica foi mineralizado pela oxidação com ácido sulfúrico em alta temperatura na presença de catalisadores (digestão de Kjeldahl), conforme Embrapa (2017).

Após a digestão, o N amoniacal que se encontrava no meio ácido foi submetido à destilação a vapor após alcalinização provocada pela adição de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$  a 40%). Esse processo converte o amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) em amônia ( $\text{NH}_3$ ), a qual foi arrastada pelo vapor d'água e condensada até alcançar a uma solução de ácido bórico ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ). A solução de ácido bórico continha indicadores (verde de bromocresol e vermelho de metila) que permitiam visualizar o processo pela alteração de cor vermelha/violeta para verde azulado após a titulação com ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  a  $0,0025 \text{ mol L}^{-1}$ ). A quantidade de N existente é proporcional à quantidade de ácido gasto na titulação.

O extrato obtido da pasta de saturação foi utilizado também para a quantificação de cloreto no solo. Para isso, o extrato foi devidamente diluído e titulado com nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$  a  $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ ) na presença da solução de cromato de potássio ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$  a 5%) como indicador.

### ***Análise estatística***

Os resultados obtidos para os dados avaliados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e para o teste de comparação de médias, aplicou-se Tukey (métodos de FL). Para os níveis de salinidade utilizou-se análise de regressão. A análise estatística foi realizada com auxílio do software SISVAR versão 5.6, considerando o nível de confiança de 95% (FERREIRA, 2011).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de pH,  $CE_{es}$ , sódio, cloreto, fósforo e potássio do solo apresentaram interação tripla ( $p < 0,05$ ) entre os fatores: método de determinação da FL, salinidade da água e camada do solo. Para as variáveis cálcio, magnésio e nitrogênio do solo, observou-se no mínimo duas interações duplas, conforme pode-se verificar na Tabela 3.

Na primeira camada do solo não houve diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre os métodos de determinação da FL. Nessa camada, entretanto, observou-se um aumento linear do pH e diretamente proporcional ao aumento da  $CE_a$  (FIGURA 2A). Na camada de 21 a 60 cm, o método de determinação da FL apresentou diferença estatística, sendo que a FL calculada a partir da fórmula de Rhoades (AS) não apresentou modelo de regressão satisfatória (FIGURA 2B). Para esse método a média de pH = 4,7. Já para o método do balanço hídrico + 15% (BS), o modelo de regressão quadrático foi o que apresentou melhor ajuste para a camada ( $R^2 = 81\%$ ).

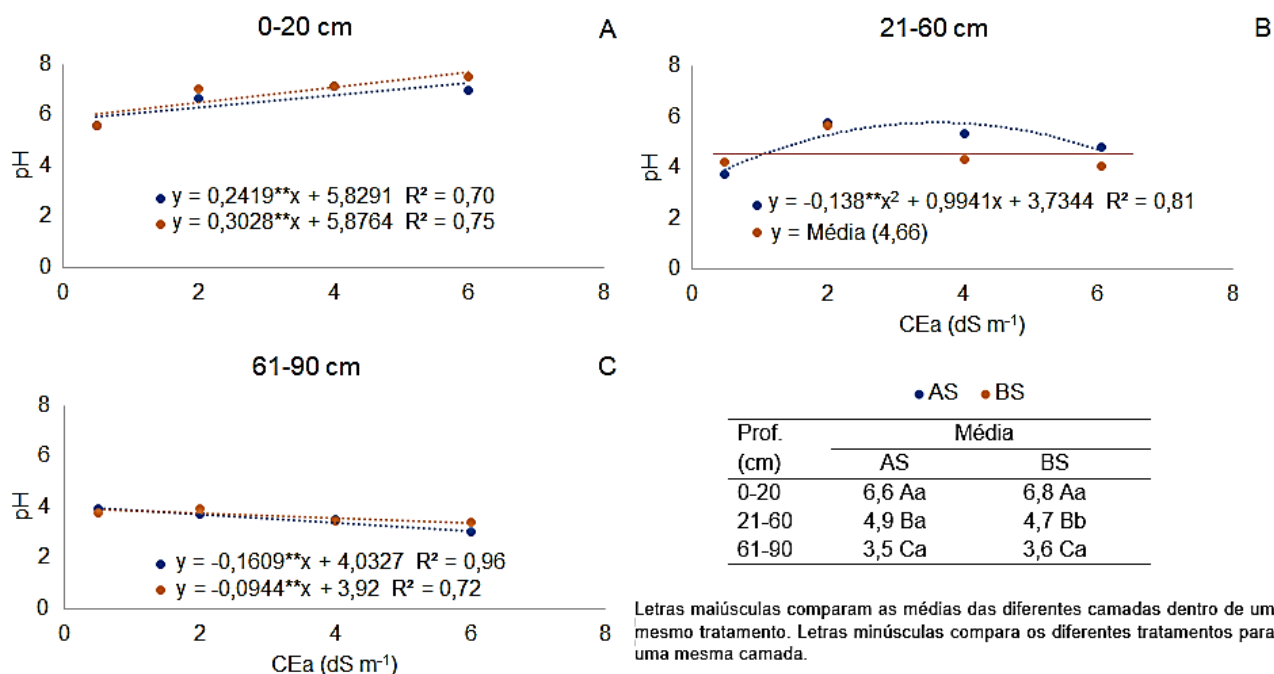
Na última camada do solo (61 a 90 cm), além dos valores baixos de pH, o modelo de regressão mostrou uma tendência de aumento da acidez dessa camada, ao passo que ocorria o incremento da CE da água (FIGURA 2C). Desta forma, as curvas respostas apresentados na primeira camada foram opostos aos observados na última. A última camada do solo era composta pelo horizonte B textural (Bt). É característico desse horizonte o incremento de argila em comparação as camadas subjacentes (EMBRAPA, 2018). Tanto pelas características físicas (TABELA 2) quanto pela a sua posição no tubo de PVC (coluna de solo), essa camada passou a maior parte do experimente saturada de água. As principais mudanças que são percebidas em solos ou camadas de solo saturada de água são as alterações no potencial redox, pH e CE.

Tabela 3 – Resumo da análise de variância com os valores  $F_{\text{calculado}}$  para o pH, condutividade elétrica do extrato saturado ( $CE_{\text{es}}$ ), cálcio trocável (Ca), magnésio trocável (Mg), sódio trocável (Na), cloreto ( $Cl^-$ ), nitrogênio (N), fósforo assimilável (P) e potássio trocável (K) do solo cultivado com milho irrigado com água de diferentes salinidades e aplicadas diferentes métodos de determinação da fração de lixiviação

FV	Valores de F calculado								
	pH	$CE_{\text{es}}$	Ca	Mg	Na	$Cl^-$	N	P	K
FL (A)	1,31ns	10,66*	1,30ns	0,94ns	3,13ns	2,37ns	6,50*	0,08ns	16,50**
Sal. (B)	19,87**	198,70**	33,51**	7,21**	79,01**	135,76**	1,32ns	2,29ns	4,35*
AxB	2,26ns	6,16**	1,27ns	0,71ns	1,70ns	4,38*	9,47**	2,04ns	9,59**
Cam. (C)	770,83**	367,70**	18,36**	7,46**	232,51**	275,14**	7,59**	1170,3**	51,51**
AxC	5,79**	1,39ns	4,12*	4,82*	1,69ns	13,88**	7,00**	0,05ns	1,60ns
BxC	20,52**	35,49**	2,90*	5,24**	17,60**	49,63**	0,81ns	2,36*	19,03**
AxBxC	2,60*	7,76**	0,57ns	1,61ns	7,33**	8,71**	0,77ns	2,35*	2,50*
CV <sub>1</sub> (%)	6,29	25,11	16,42	33,48	27,01	18,78	4,74	22,91	28,51
CV <sub>2</sub> (%)	8,61	17,12	23,03	30,01	25,44	18,70	2,96	29,23	28,94
CV <sub>3</sub> (%)	6,78	13,90	13,95	31,66	18,27	15,59	4,15	26,09	23,43
	--	dS m <sup>-1</sup>	----- cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----			-----mg kg <sup>-1</sup> -----		cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	
Média AS	5,10	2,19 b	1,63	0,36	1,14	2,04	0,32 b	10,73	0,10 b
Média BS	5,00	2,30 a	1,69	0,38	1,26	2,17	0,34 a	10,76	0,12 a

FV – Fonte de variação, FL – Fração de lixiviação, Sal. – Salinidade da água, Cam – Camada do solo, CV – coeficiente de variação, ns, \*\*, \* Não significativo, significativo a 1% e 5% de probabilidade pelo Teste F, respectivamente. AS: fração de lixiviação calculada de acordo com fórmula proposta por Rhoades; BS: fração de lixiviação determinado a partir do balanço hídrico + 15% de FL.

Figura 2 – Curvas de regressão do pH na primeira (A), segunda (B) e terceira (C) camadas do solo, em função da condutividade elétrica da água de irrigação (CE<sub>a</sub>) e método empregado no cálculo da fração de lixiviação



AS: fração de lixiviação calculado de acordo com fórmula proposta por Rhoades; BS: fração de lixiviação determinado a partir do balanço hídrico + 15% de FL. \*\* - significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F. “Y = Média” foi utilizado para representar casos em que se encontrou diferença estatística significativa ( $p < 0,05$ ), porém, sem modelo de regressão satisfatório.

Camargo *et al.* (1999), discorrem sobre as alterações no solo devido ao alagamento contínuo. Segundo os autores, nessas camadas, a escassez de oxigênio promove o surgimento de um ambiente redox. Na falta do oxigênio, os microrganismos anaeróbicos facultativos e anaeróbicos obrigatórios do solo utilizam elementos alternativos como aceptores de elétrons durante a decomposição da matéria orgânica, dentre eles estão o  $\text{NO}_3^-$ , Mn, Fe e  $\text{SO}_4^{2-}$  (CAMARGO *et al.*, 1999; SJØGAARD *et al.*, 2018). A alteração química desses elementos e da matéria orgânica mantém o pH do solo na faixa de neutralidade durante o período de saturação. Porém, após drenado, os valores de pH do solo são drasticamente reduzidos (CAMARGO *et al.*, 1999). Ao retirar o solo dos tubos de PVC e particionar os horizontes, permitiu-se a drenagem da água da última camada e, em consequência, a redução do pH.

Dentre os elementos estudados em ambientes redox, o nitrogênio, o ferro e o enxofre são os mais documentados na literatura, sobretudo, em ambientes costeiros (NOBREGA *et al.*, 2018; SJØGAARD *et al.*, 2018). No entanto, no caso dos Argissolos não é comum a presença de quantidades significativas de material sulfídrico

(EMBRAPA, 2018) e, a própria posição em que se encontrava o horizonte Bt (prof. > 60 cm) dentro da coluna de solo, não contribui para uma quantidade expressiva de nitrogênio. Diante disto, inferimos que as principais transformações ocorreram no ferro (processo de ferrólise). Na ferrólise ocorre a transformação e solubilização do ferro. Durante esse processo, existe a produção de  $H^+$  e, conseqüentemente, a redução do pH do meio (CORINGA *et al.*, 2012).

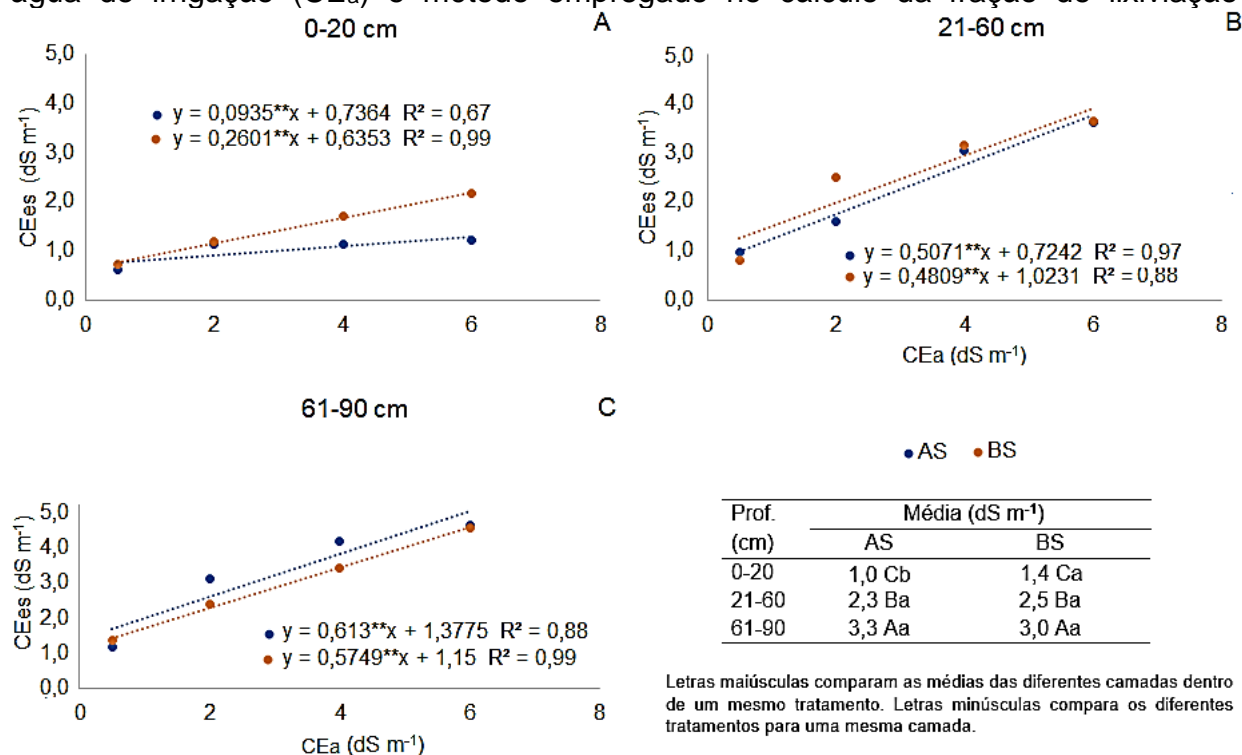
A quantidade de ferro não foi determinada nesse experimento, porém a quantidade desse elemento no horizonte Bt é apontada no segundo nível categórico do solo, classificado como Argissolo Vermelho-amarelo. A cor vermelha e amarela no solo é atribuída a presença de duas formas de ferro, respectivamente, hematita e goetita (WANG *et al.*, 2018).

Além da redução do pH, de acordo com Carmargo *et al.* (1999), a maior solubilidade do Fe em ambientes alagados pode contribuir para o aumento da CE do solo que também foi observado nesses horizontes, conforme constatados na Figura 3. Porém, a maior contribuição na elevação da  $CE_{es}$ , independente do método de determinação da FL, foi a presença dos sais na água de irrigação. Assim, verificou-se o aumento da  $CE_{es}$  nos tratamentos em função do aumento da CE água de irrigação em todas as camadas do solo.

O modelo de regressão nas três camadas foi do tipo linear, diretamente proporcional ao aumento da  $CE_a$ . Sendo que, apenas na primeira camada foi constatado diferença estatística ( $p < 0,05$ ) entre os métodos de determinação da FL. Na Figura 3A, observou-se uma maior inclinação da reta em BS (coef. angular de 0,26) em comparação a AS (coef. angular de 0,09).

Esses resultados mostraram que a fração lixiviação usado pelo método de Rhoades foi capaz de remover maiores quantidades de sais na camada de 0 a 20 cm. Mantendo assim, um modesto aumento da  $CE_{es}$  em função do incremento da salinidade da água de irrigação. Nas demais profundidades, as curvas respostas de AS e BS apresentaram valores de coeficientes angulares bem próximos e, conseqüentemente, apresentaram padrão de resposta semelhante.

Figura 3 – Curvas de regressão da CE do extrato de saturação do solo na primeira (A), segunda (B) e terceira (C) camadas do solo, em função da condutividade elétrica da água de irrigação ( $CE_a$ ) e método empregado no cálculo da fração de lixiviação

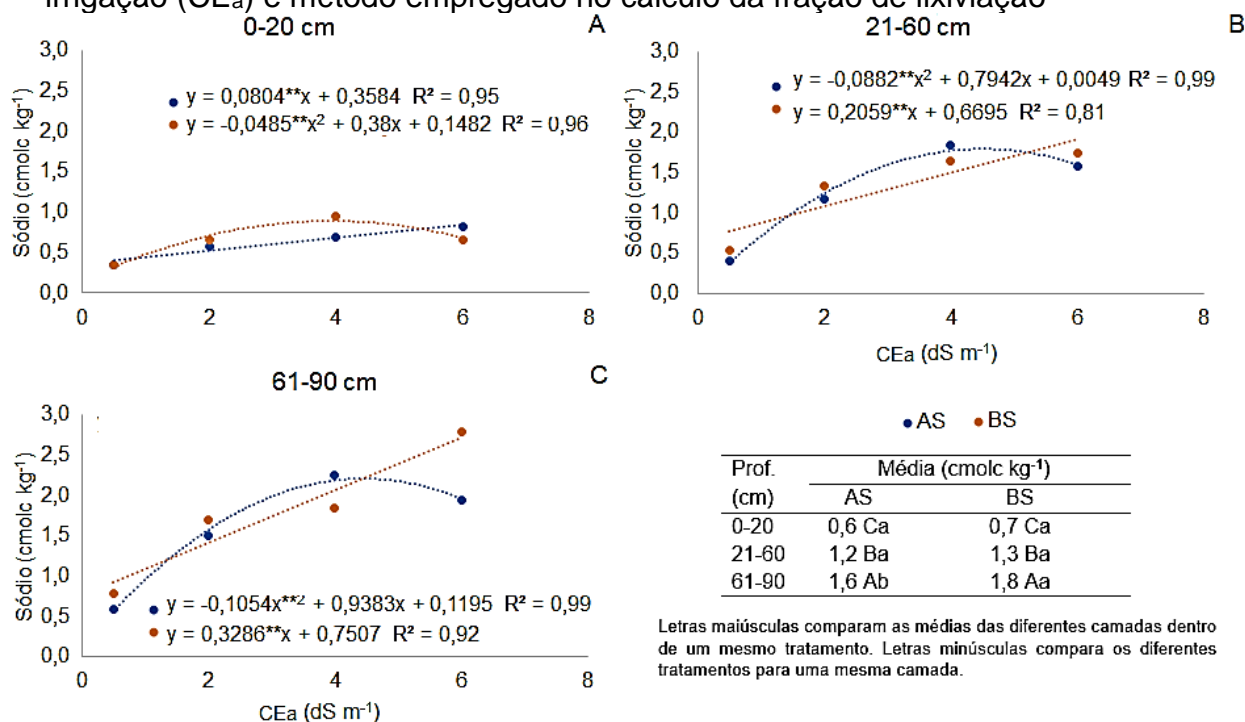


AS: fração de lixiviação calculado de acordo com fórmula proposta por Rhoades; BS: fração de lixiviação determinado a partir do balanço hídrico + 15% de FL. “\*\*\*” e “\*\*” significativo a 1% e 5% de probabilidade pelo Teste F, respectivamente.

Em ambos os métodos de determinação da FL, os tratamentos irrigados com água de baixa salinidade ( $0,5\ dS\ m^{-1}$ ) apresentaram  $CE_{es}$  próximo de  $1\ dS\ m^{-1}$  nas camadas de 21 a 60 e 61 a 90 cm (FIGURAS 3B e 3C). A partir da  $CE_a$  de  $2\ dS\ m^{-1}$ , a última camada apresentou  $CE_{es}$  superiores as da segunda camada e, especialmente superiores as da primeira camada. O aumento da  $CE_{es}$  na camada de 61 a 90 cm, deve-se a translocação dos sais das camadas superficiais para as camadas mais profundas devido a fração de lixiviação (AYERS e WESTCOT, 1985). Além disso, a maior capacidade de retenção de íons dos horizontes mais argilosos, como ocorre no horizonte Bt, pode contribuir para a retenção de sais nessa camada (BRADY e WEIL, 2013; EMBRAPA, 2018).

Além da  $CE_{es}$ , a análise de sódio nas diferentes camadas do solo mostrou o aumento da concentração do elemento em profundidade apenas nos tratamentos salinos ( $CE_a \geq 2\ dS\ m^{-1}$ ). Para os tratamentos irrigados com água de CE de  $0,5\ dS\ m^{-1}$ , os valores médios de sódio foram entorno de  $0,5\ cmol_c\ kg^{-1}$ , tanto para AS quanto para BS nas três camadas (FIGURA 4).

Figura 4 – Curvas de regressão do sódio trocável na primeira (A), segunda (B) e terceira (C) camadas do solo, em função da condutividade elétrica da água de irrigação (CE<sub>a</sub>) e método empregado no cálculo da fração de lixiviação



AS: fração de lixiviação calculado de acordo com fórmula proposta por Rhoades; BS: fração de lixiviação determinado a partir do balanço hídrico + 15% de FL. \*\* - significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F.

Ressalta-se que mesmo a irrigação praticada com água de baixa salinidade (0,5 dS m<sup>-1</sup>), essa foi capaz de promover o aumento de Na em todas as camadas do solo quando comparado aos valores encontrados antes do início do experimento (TABELA 1). Esse fato mostra que mesmo quando se utiliza na irrigação água com baixa concentração de sais, existe a tendência de aumento desses no solo ao longo do tempo.

Comparando as curvas de regressão das profundidades de 0 a 20 cm com as de 21 a 60 cm, percebe-se a inversão do padrão de respostas entre os métodos de determinação da FL. Na primeira camada, temos AS uma regressão linear diretamente proporcional ao aumento da CE<sub>a</sub>. Nessa mesma camada, BS comportou-se como uma equação do tipo quadrática com ponto de máxima quando a CE<sub>a</sub> chegou 3,92 dS m<sup>-1</sup> (calculado). Na segunda camada, AS apresentou uma curva resposta com função quadrática com ponto de máxima em 4,5 dS m<sup>-1</sup> (calculado) enquanto BS foi do tipo linear e diretamente proporcional ao aumento da CE<sub>a</sub>. Esse padrão repetiu-se

na última camada do solo, porém, com médias de concentração de Na superior em ambos os tratamentos.

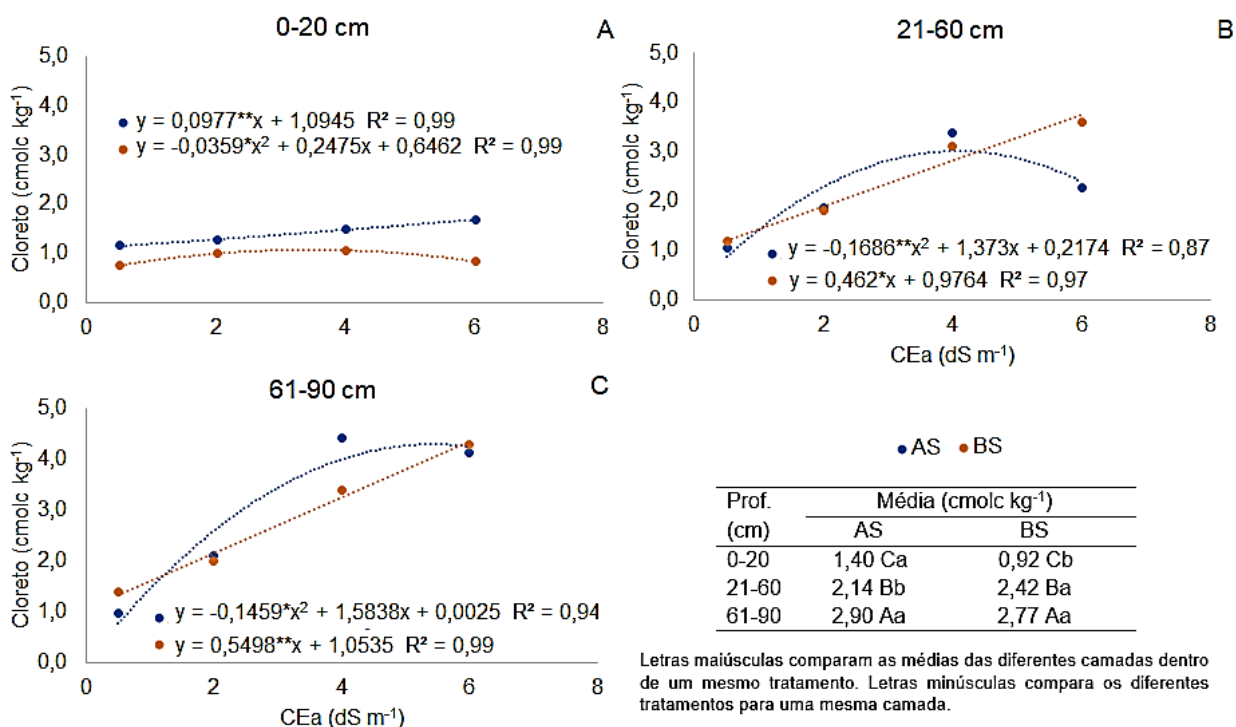
Saqib *et al.* (2008) discorrem que a toxicidade de Na é o mais notável efeito da salinidade no crescimento vegetal. Com o aumento dos teores de Na e de Cl ocorre uma diminuição dos teores de K e de Ca na planta (AZEVEDO NETO e TABOSA, 2000; FAROOQ *et al.*, 2015). Com a acumulação de altos teores de Na e Cl, diminui a absorção de nutrientes catiônicos e aniônicos, ocasionando desequilíbrios nutricionais e, conseqüentemente queda na produção das culturas (RAINS e GOYAL, 2003), conforme constatou se no crescimento e produção do milho (capítulo 1). Como os íons Na e Cl são os mais abundantes em ambientes salino (RIBEIRO, RIBEIRO FILHO e JACOMINE, 2016) e, o aumento de um deles frequentemente acompanha o aumento do outro, a discussão sobre esses elementos será realizada logo após a análise de dados do cloreto.

Os mesmos modelos de regressão do sódio foram verificados para as concentrações de cloreto nas diferentes camadas do solo (FIGURA 5). Essa semelhança já era esperada, uma vez que o cloreto de sódio (NaCl) foi o composto que correspondeu a 70% da composição salina utilizada na água de irrigação.

Para os valores de cloreto, verificou-se uma interação tripla ( $p < 0,01$ ) entre os fatores. Sendo que, a média de AS foi 34% maior que a de BS na primeira camada. Já na segunda camada, os valores de Cl<sup>-</sup> em BS foi 11,6% superior aos de AS. Na profundidade de 61 a 90 cm, não houve diferença estatística em os métodos de determinação da FL. Nesse caso, apenas a salinidade foi responsável pelo maior acúmulo de cloreto nas parcelas onde as CE<sub>a</sub> foram mais elevadas.



Figura 5 – Curvas de regressão do cloreto na primeira (A), segunda (B) e terceira (C) camadas do solo, em função da condutividade elétrica da água de irrigação (CE<sub>a</sub>) e método empregado no cálculo da fração de lixiviação



AS: fração de lixiviação calculado de acordo com fórmula proposta por Rhoades; BS: fração de lixiviação determinado a partir do balanço hídrico + 15% de FL. “\*\*\*” e “\*” significativo a 1% e 5% de probabilidade pelo Teste F, respectivamente.

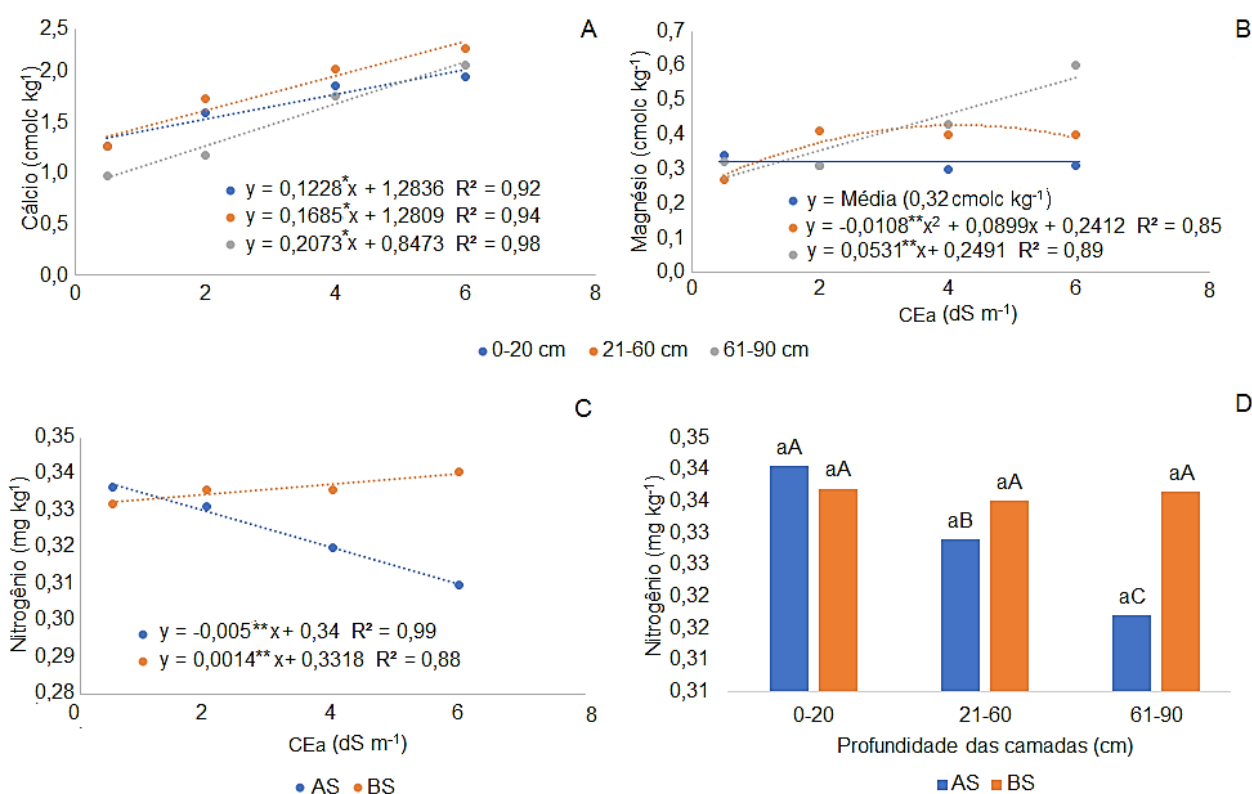
O cloro é um elemento essencial para o desenvolvimento das plantas (MALAVOLTA *et al.*, 1997). No entanto, esse íon é exigido em baixas quantidades por plantas glicólicas, como o milho (TAIZ *et al.*, 2017; BHATLA e LAL, 2018). Conforme analisado na Tabela 3, os valores de cloreto encontraram-se acima de todos os outros elementos avaliados. Nessa situação, o Cl<sup>-</sup> acaba provocando queda no rendimento da planta (discutido no capítulo 1), bem como compete por sítios de ligações com o nitrogênio nos coloides do solo.

Assis Júnior *et al.* (2007), em experimento usando feijão-de-corda (*Vigna unguiculata* L. Walp.), salientou que tanto o acúmulo Cl<sup>-</sup> como o de Na contribuíram para a inibição do crescimento e do rendimento da cultura. Shenker, Ben-Gal e Shani (2003) discorrem sobre o efeito antagonista entre os íons de nitrato e cloro. De acordo com os autores, estes competem pelos mesmos sítios de transporte dentro da planta. No caso do Na, a interação antagônica ocorre com o Ca, Mg e principalmente com o K. A competição entre o sódio e os demais cátions também ocorre na fase sólida do solo (BRADY e WEIL, 2013; LACERDA *et al.*, 2018). A grande quantidade de sódio

na solução dos solos afetados por sais é a principal razão desde elemento substituir outros cátions nas argilas. Essa lógica é aplicada também ao cloreto que tem efeitos negativos na adsorção de nitrato nos coloides do solo (BRADY e WEIL, 2013).

Nas três camadas, o aumento dos níveis de Ca seguiu o modelo linear diretamente proporcional ao aumento da  $CE_a$  (FIGURA 6A). Apesar dos valores do elemento não apresentarem discrepâncias entre as diferentes camadas, a camada de 21 a 60 cm apresentou a maior média (1,82  $cmol_c kg^{-1}$ ), seguido pela camada superficial (1,80  $cmol_c kg^{-1}$ ) e a última camada (1,49  $cmol_c kg^{-1}$ ). Assim como o sódio e o cloreto, o cálcio e o magnésio fizeram parte da composição salina da água de irrigação, nas proporções respectivas de 20% ( $CaCl_2$ ) e 10% ( $MgCl_2$ ).

Figura 6 – Curvas de regressão do cálcio (A) e magnésio (B) trocáveis nas três camadas do solo em função da  $CE_a$  da água de irrigação. Curva de regressão do nitrogênio (C) em função da condutividade elétrica da água de irrigação ( $CE_a$ ) e método empregado no cálculo da fração de lixiviação. Concentração de nitrogênio nas camadas do solo (D), em função do método empregado no cálculo da fração de lixiviação



\*\* e \* significativo a 1% e 5% de probabilidade pelo Teste F, respectivamente. "Y = Média" representa casos que se encontrou diferença estatística significativa ( $p < 0,05$ ), porém, sem modelo de regressão satisfatório. Letras maiúsculas comparam médias dentro do mesmo agrupamento e letras minúsculas comparam médias entre os agrupamentos pelo teste de Tukey.

É natural o aumento dos teores de cálcio no solo à medida que as parcelas eram irrigadas diariamente com água com altas concentrações de sais. Ao irrigar tomateiros com água salina em alternância com água não salina, Li *et al.* (2019) verificaram o acréscimo da concentração de cálcio no solo em que as plantas passaram mais tempo submetidas a água salina. Assim como o cloreto de sódio, é comum a presença de outros sais tal como sulfato de cálcio e cloreto de cálcio e cloreto de magnésio na água salina (AYERS e WESTCOT, 1985).

A concentração de magnésio no solo aumentou em profundidade e não diferiu estatisticamente ( $p < 0,05$ ) entre os métodos de determinação da FL (FIGURA 6B). Na última camada do solo, o valor médio do cátion foi de  $0,42 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , contra  $0,32 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  da camada superficial (menor média). Os valores de Mg foram praticamente constantes na primeira camada, mesmo para valores elevados de  $CE_a$ . Já na última camada, a concentração do elemento cresceu seguindo o incremento da salinidade da água de irrigação. Esse evento mostra que a lixiviação do magnésio ocorreu com maior expressão nos tratamentos mais salinos.

Para o nitrogênio, constatou-se interação ( $p < 0,01$ ) entre os métodos de determinação da FL e as camadas do solo. Os valores de nitrogênio encontrado nos tratamentos foram inferiores a  $0,4 \text{ g kg}^{-1}$  de solo. Esse baixo teor é atribuído ao consumo por parte das plantas e a lixiviação do elemento na forma de nitrato ao longo do experimento. A fonte de N fornecido as plantas foi a ureia e, de acordo com Novais *et al.* (2007), é um fertilizante sólido extremamente higroscópico. Deste modo, quando aplicado ao solo pode ser rapidamente lixiviado na forma de  $NO_3$ , sobretudo em sistemas com irrigações frequentes (como foi realizado nesse experimento).

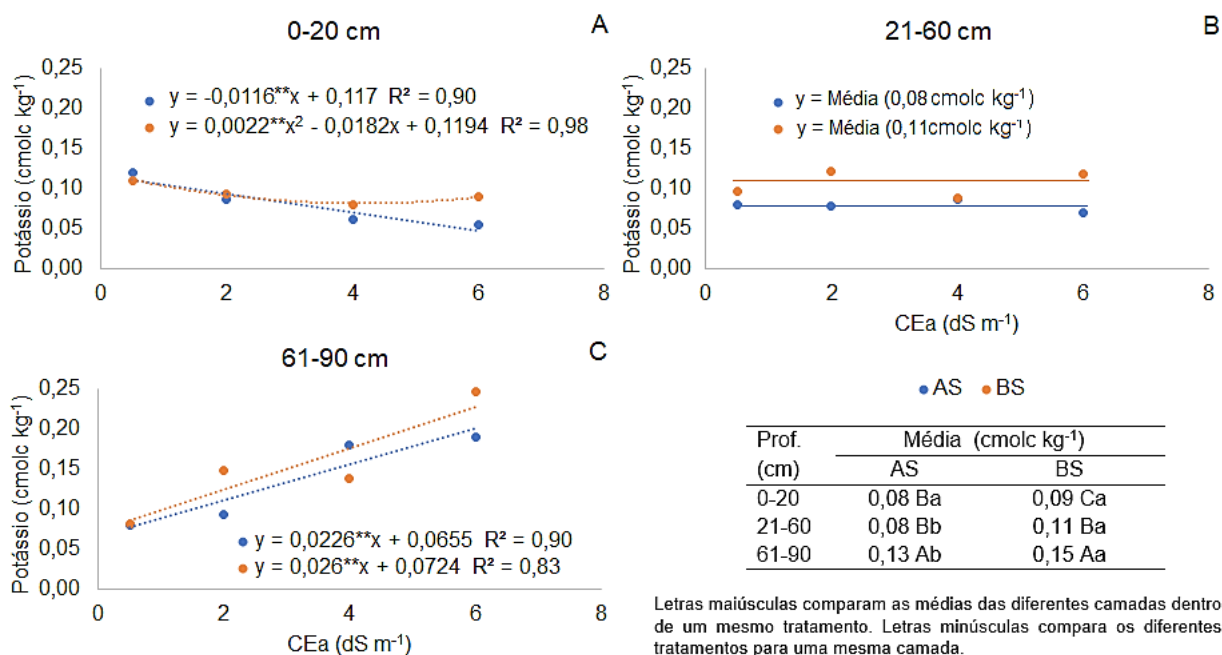
Na Figura 6C foi verificada uma queda acentuada de N em função do aumento da  $CE_a$  em AS. Entretanto, o oposto foi observado em relação a curva resposta de BS. Em vários estudos (SHENKER, BEN-GAL e SHANI, 2003, LACERDA *et al.*, 2016; BRAZ *et al.*, 2019) verificou-se que quando o milho é submetido ao estresse salino, a absorção de N decresce à medida que as plantas são irrigadas com água de maior salinidade. Devido a esse baixo consumo do elemento pelo vegetal, verifica-se o acúmulo desse nutriente no solo, conforme constatado no tratamento BS. Logicamente, o mesmo teria ocorrido com AS, não fosse as grandes quantidades de água empregado nesse tratamento. Esse aporte de água em AS promoveu a lixiviação do N na forma de nitrato, como se pôde observar na análise do lixiviado do capítulo 2 (FIGURA 7A).

Li *et al.* (2019) cultivaram tomateiros com alternância de aplicação de água salina em diferentes fases fenológicas. Os autores observaram que nas fases fenológicas em que as plantas receberam água salina, ocorreu maior acúmulo de N no solo. Lacerda *et al.* (2018) constataram maiores perda de N nos tratamentos com maiores doses de fertilizantes nitrogenados e maiores salinidade da água de irrigação. Nesse caso, os autores verificaram a maior concentração do elemento a partir de 50 cm de profundidade do solo, corroborando assim, com a ideia de lixiviação do nutriente em ambientes salinos.

Na Figura 6D, observou-se uma concentração de N constante nas diferentes profundidades do solo em BS. Entretanto, em AS, as quantidades de N foram maiores na primeira camada, diminuindo em profundidade. Porém, na fase final do experimento, as condições de luminosidade na casa de vegetação e a maior umidade do solo nos tratamentos AS, favoreceram o crescimento de algas na superfície do solo (constatado visualmente). De acordo com Moreira e Kasuya (2016), as algas são microrganismo com baixa relação carbono/nitrogênio ( $C/N < 20$ ). Somado a isso, algumas são capazes de fixar o nitrogênio atmosférico no solo. Deste modo, a incorporação desses microrganismos durante a coleta do solo pode ter contribuído para o aumento de N na camada de 0 a 20 cm do solo.

Em relação ao potássio, tanto para AS quanto para BS, constatou-se na primeira camada uma menor concentração do nutriente à medida que a CE da água aumentou (FIGURA 7A). Esse elemento foi translocado para as camadas subjacentes, acumulando-se na última camada do solo (FIGURA 7C). Essa translocação foi mais expressiva em AS, uma vez que, na primeira camada, os níveis de K do solo decresceram linearmente em função do incremento da  $CE_a$ . Ainda na camada superficial, a curva resposta de BS foi do tipo quadrática. Nesse caso, verificou-se uma queda na concentração de K no solo até uma  $CE_a$  de  $4 \text{ dS m}^{-1}$  e, a partir desse ponto, um aumento no nível do elemento na camada superficial quando a  $CE_a$  foi de  $6 \text{ dS m}^{-1}$ .

Figura 7 – Curvas de regressão do potássio na primeira (A), segunda (B) e terceira (C) camadas do solo, em função da condutividade elétrica da água de irrigação ( $CE_a$ ) e método empregado no cálculo da fração de lixiviação



AS: fração de lixiviação calculado de acordo com fórmula proposta por Rhoades; BS: fração de lixiviação determinado a partir do balanço hídrico + 15% de FL. “\*\*\*” e “\*\*” significativo a 1% e 5% de probabilidade pelo Teste F, respectivamente. “Y = Média” foi utilizado para representar casos em que encontrou-se diferença estatística significativa ( $p < 0,05$ ), porém, sem modelo de regressão satisfatório.

Assim como no caso do nitrogênio, o estresse salino pode ter diminuído a absorção de K pela planta. Desta forma, quando o vegetal foi submetida a um maior estresse salino ( $CE_a = 6 \text{ dS m}^{-1}$ ), o potássio passou a acumular-se no solo em BS. Já em AS, os maiores volumes de água aplicado na FL promoveu a translocação desse elemento para as camadas mais profundas do solo, bem como provocou uma maior concentração do elemento no lixiviado (CAPÍTULO 2; FIGURA 7B). De toda a forma, na última camada do solo, tanto em AS quanto em BS, constatou-se o aumento das médias de K em função do aumento da salinidade da água de irrigação.

Mendes *et al.* (2016) analisaram o comportamento do K em dois solos com texturas diferentes e submetidos a diferentes lâminas de água. Para os dois solos, a lixiviação do potássio teve relação direta com o aumento das lâminas. Nesse estudo, as perdas de K observadas no solo arenoso chegou 57% do total de K aplicado.

Lacerda *et al.* (2018), verificaram a correlação entre a aplicação de água de diferentes salinidades (0,5, 2,5, 5 e 7,5  $\text{dS m}^{-1}$ ) e a concentração iônica nas diferentes camadas de um solo arenoso cultivado com milho. Os autores verificaram o aumento do acúmulo de K em maiores profundidades do solo à medida que se

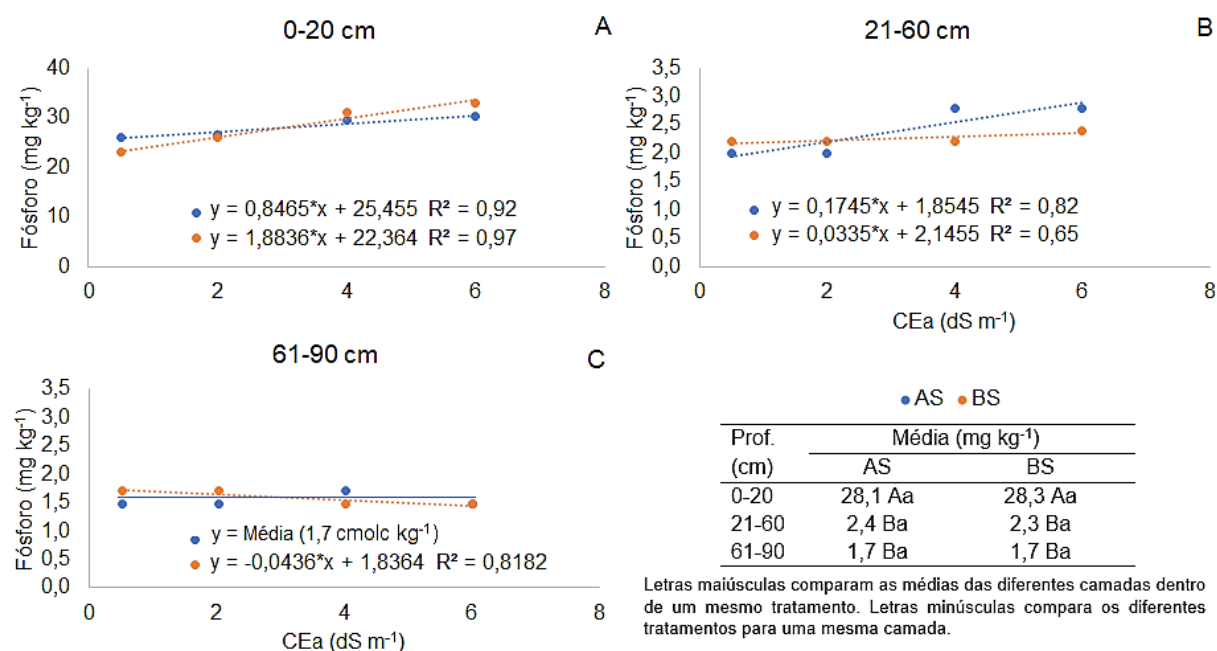
aplicou água de maior salinidade nas plantas. No caso da aplicação de água com CE de  $7,5 \text{ dS m}^{-1}$ , os autores observaram que o acúmulo de K no solo foi 153% maior do que naqueles tratamentos irrigados com água de baixa salinidade ( $0,5 \text{ dS m}^{-1}$ ).

Shabala e Cuin (2008) discorrem que um dos motivos do baixo aproveitamento do potássio em plantas submetidas ao estresse salino, deve-se a similaridade físico-química entre o Na e o K. Os autores explanam que o sódio, compete com o potássio dentro da planta pelos sítios de transporte iônico e em processos metabólicos. Esses resultados também foram apontados no tecido foliar do milho do presente trabalho (CAPÍTULO 2; FIGURAS 3B e 3D).

No solo, as competições por sítios de ligações nas argilas podem ocorrer entre os cátions de cálcio, magnésio, sódio e potássio. Sendo que, aqueles que se encontram em maior quantidade levam vantagem na saturação das cargas das frações coloidais (GARCIA *et al.*, 2008; BRADY e WHEIL, 2013). Num ambiente de aporte constante de sais rico em Na, Ca e Mg, como o do presente estudo, esses elementos tendem a aumentar sua concentração no solo ao passo que as concentrações de K diminuem, conforme observado nas Figuras 4, 6A, 6B e 7.

Analisando os valores de fósforo, observou-se o aumento do nutriente na primeira e segunda camada em função do aumento da  $CE_a$  (FIGURA 8). Infere-se que o aumento da salinidade do solo nos tratamentos que receberam água com maior concentração de sais, promoveu um menor consumo do elemento pela planta. Shenker, Ben-gal e Shani (2003) discorrem que a quando submetido ao estresse salino, os vegetais tendem a diminuir o consumo de água e nutrientes. Deste modo, as plantas que receberam água com salinidade menor ou igual a  $2 \text{ dS m}^{-1}$ , conseguiram extrair mais P do solo quando comparada as demais. Essa afirmação é consolidada pelos resultados de P foliar observada nas plantas de milho desse experimento (CAPÍTULO 2, FIGURA 2C).

Figura 8 – Curvas de regressão do fósforo na primeira (A), segunda (B) e terceira (C) camada do solo, em função da condutividade elétrica da água de irrigação (CE<sub>a</sub>) e método empregado no cálculo da fração de lixiviação



AS: fração de lixiviação calculado de acordo com fórmula proposta por Rhoades; BS: fração de lixiviação determinado a partir do balanço hídrico + 15% de FL. “\*” significativo a nível de 5% de probabilidade pelo Teste F. “Y = Média” foi utilizado para representar casos em que se encontrou diferença estatística significativa ( $p < 0,05$ ), porém, sem modelo de regressão satisfatório.

O fósforo aplicado na forma de superfosfato simples (usado nesse estudo) apresenta uma baixa solubilidade e mobilidade no solo (EMBRAPA, 2011; WANG *et al.*, 2018). Essas características corroboram com os valores encontrado em superfície e subsuperfície desse elemento (FIGURA 8). Nesse estudo, constatou-se que mais de 85% do fósforo ficou concentrado na camada de 0 a 20 cm do solo. Em média, o teor de P na primeira camada foi de 28,28 mg kg<sup>-1</sup>, enquanto nas duas camadas seguintes foram respectivamente 2,35 e 1,67 mg kg<sup>-1</sup>.

A baixa capacidade do fósforo, quando aplicado na forma sólida, de deslocamento dentro do perfil do solo e sua alta de adsorção na matriz do solo, dificulta a aquisição do elemento pelos vegetais (OWEN JR *et al.*, 2008). Em contrapartida, essa característica também é responsável pelas baixas perdas desse nutriente por lixiviação, conforme verificado da Tabela 2 do capítulo 2. Devido à alta reatividade do P com a fase sólida do solo, é comum que a recomendação de adubação fosfatada seja superior à adubação potássica (EMBRAPA, 2006; NOVAIS *et al.*, 2007) mesmo sabendo que a exigência nutricional de K pelos vegetais sejam superiores (MALAVOLTA *et al.*, 1997; TAIZ *et al.*, 2017; BHATLA e LAL, 2018).

De modo geral, afirma-se mediante os resultados do experimento que o N e K mostraram tendência de decréscimo na sua concentração no solo em função do aumento da salinidade da água de irrigação e, conseqüentemente do solo. Esse decréscimo foi mais expressivo nos tratamentos onde a FL foi determinada pelo método de Rhoades (AS). As perdas desses nutrientes ocorreram principalmente por lixiviação, uma vez que, na análise do lixiviado (CAPÍTULO 2), percebeu-se o aumento da concentração desses elementos onde se aplicou mais água (AS).

Além disso, a salinidade da água de irrigação interferiu na absorção dos nutrientes pelas plantas devido a inibição do crescimento vegetal e aos danos provocados aos processos fisiológicos (SHENKER, BEN-GAL e SHANI, 2003; LACERDA *et al.*, 2016). Deste modo, tende-se a ocorrer a maior lixiviação em nutrientes mais solúveis (como o N e K) e o acúmulo no solo dos menos solúveis (como o P).

É importante ressaltar que para uma  $CE_a \geq 4 \text{ dS m}^{-1}$ , os volumes de água demandado pelo método de Rhoades foram muito superiores aos do balanço hídrico +15%, o que tornaria o método menos eficiente em termos de utilização da água, com maiores custos e menor retorno por volume de água aplicado. De toda forma, esse maior aporte de água não foi capaz de diminuir os efeitos negativos da salinidade nas plantas de milho (CAPÍTULO 1) e ainda promoveu o menor aproveitamento de N, P e K pelas plantas (CAPÍTULOS 2 e 3).



## CONCLUSÃO

O pH do solo variou em profundidade, saindo da faixa de neutralidade na camada superficial para faixa de acidez na última camada. Verificou-se o aumento da  $CE_{es}$  em profundidade e maiores médias nos tratamentos com níveis de sais mais elevados na água.

As médias de sódio, magnésio e cloreto aumentaram com o incremento da salinidade. Esses elementos concentraram majoritariamente em profundidade no solo devido a translocação provocada pela fração de lixiviação.

Devido aos maiores volumes de água, as menores concentrações de nitrogênio e potássio no solo ocorreram nos tratamentos onde a FL foi determinada pela fórmula de Rhoades. Esse método acabou contribuindo para as maiores perdas desses nutrientes por lixiviação. No método de determinação da FL pelo balanço hídrico do solo + 15%, os valores de N do solo cresceram com o aumento da  $CE_a$  enquanto o oposto foi observado pelo método de Rhoades.

Mais de 85% do fósforo do solo foi encontrado na camada primeira camada do solo. Nesse caso, constata-se que as características de solubilidade e mobilidade de alguns elementos químicos podem ser mais relevantes na sua persistência no solo do que os métodos de determinação da FL.

## REFERÊNCIAS

- ASSIS JÚNIOR, J. O.; LACERDA, C. F.; SILVA, F. B.; SILVA, F. L. B.; BEZERRA, M. A.; GHEYI, H. R. Produtividade do feijão-de-corda e acúmulo de sais no solo em função da fração de lixiviação e da salinidade da água de irrigação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.3, p.702-713, 2007.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **Water quality for agriculture**. FAO Irrigation and Drainage Paper 29. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985. 174 p.
- AZEVEDO NETO, A. D.; TABOSA, J. N. Estresse salino em plântulas de milho: parte II. Distribuição dos macronutrientes catiônicos e suas relações com sódio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, p.165-171, 2000.
- BARROS, G. S. C.; ALVES, L. R. A. maior eficiência econômica e técnica depende do suporte das políticas públicas. **Revista Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 13, p. 4-7, 2015.
- BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C; SILVA, D. D.; SOARES, A. A. **Manual de irrigação**. 9. ed. Viçosa: Editora UFV, 2019, 545 p. il.
- BHATLA S. C.; LAL, M. A. **Plant physiology, development and metabolism**. Singapore: Springer Nature Singapore Pte. Ltd, 2018, 1271 p.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 704 p. il.
- CAMARGO, F. A. O., SANTOS, G. A.; ZONTA, E. Alterações eletroquímicas em solos inundados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.29, n.1, p.171-9, 1999.
- CORINGA, E. D. A. O.; COUTO, E. G.; OTERO, X. L.; TORRADO, P. V. Atributos de solos hidromórficos no Pantanal Norte Matogrossense. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 42, n. 1, p. 19–28, 2012.
- EMBRAPA. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa, 2011, 771 p. il.
- EMBRAPA. **Manual de análises de solo**. 3. ed. revisado e ampliado – Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.
- EMBRAPA. **Nutrição e adubação do milho**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica 78, 2006. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/490410> Acesso em: 22 nov. 2017.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solo**. 5. ed. Brasília, DF: SBCS, 2018. 356p.

FAROOQ, M.; HUSSAIN, M.; WAKEEL, A.; SIDDIQUE, K. H. M. Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, [s. l.], v. 35, p. 461–481, 2015.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FERREIRA, P. A.; SILVA, B. L.; RUIZ, H.A. Aspectos físicos e químicos de solos em regiões áridas e semiáridas. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. DA S.; LACERDA, C. F. DE; GOMES FILHO, E (ed.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 2.ed. Fortaleza: INCTSal, 2016. Cap.3, p.17-34.

FREIRE, J. L. O.; CAVALCANTE, L. F.; DIAS T. J.; DANTAS, M. M. M.; MACEDO, L. P. M.; AZEVEDO, T. H. O. Teores de micronutrientes no solo e no tecido foliar do maracujazeiro amarelo sob uso de atenuantes do estresse salino. **Revista Agropecuária Técnica**, Areia, v.36, p.65-81, 2015.

FREIRE, J. L. O.; CAVALCANTE, L. F.; REBEQUI, A. M.; DIAS, T. J.; VIEIRA, M. S. Crescimento do maracujazeiro amarelo sob estresse salino e biofertilização em ambiente protegido contra perdas hídricas. **Holos**, Natal, v.28, p.55-68, 2012.

GAINES, T. P.; PAKER, M. B.; GASCHO, G. J. Automated determination of chlorides in soil and plant tissue by sodium nitrate extraction. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 76, n.3, p. 371-374, 1984.

GARCIA, G. O.; MARTINS FILHO, S.; REIS, E. F.; MORAES, W. B.; NAZÁRIO, A. A. Alterações químicas de dois solos irrigados com água salina. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 39, n. 1, p.7-18, 2008.

GHEYI, H. R.; DIAS, N. DA S.; LACERDA, C. F. DE; GOMES FILHO, E. **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 2.ed. Fortaleza: INCTSal, 2016. 504p. il.

HENG, L. K.; WHITE, R. E.; BOLAN, N. S.; SCOTTER, D. R. Leaching losses of major nutrients from a mole-drained soil under pasture. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, [s. l.], v. 34, n. 3, p. 325-334, 1991. DOI: 10.1080/00288233.1991.10417672.

LACERDA, C. F.; CAMBRAIA, J.; CANO, M. A. O.; RUIZ, H. A.; PRISCO, J. T. Solute accumulation and distribution during shoot and leaf development in two sorghum genotypes under salt stress. **Environmental and Experimental Botany**, [s. l.], v.49, n.2, p.107-20, 2003.

LACERDA, C. F.; FERREIRA, J. F. S.; LIU, X.; SUAREZ, D. L. Evapotranspiration as a criterion to estimate nitrogen requirement of maize under salt stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**, [s. l.], v.202, p.192-202, 2016.

LACERDA, C. F.; FERREIRA, J. F. S.; SUAREZ, D. L.; FREITAS, E. D.; LIU, X. Evidence of nitrogen and potassium losses in soil columns cultivated with maize

under salt stress. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 8, p. 553-557, 2018.

LI, J.; CHEN, J.; QU, Z.; WANG, S.; HE, P.; ZHANG, N. Effects of alternating irrigation with fresh and saline water on the soil salt, soil nutrients, and yield of tomatoes. **Water**, [s. l.], v. 11, 1693, 2019. DOI:10.3390/w11081693.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba, SP: POTAFOS, 1997. 319 p.

MARTINEZ, M. A.; SILVA, J. B. G.; PEREIRA, D. dos R. Modelagem do movimento de sais no solo. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. DA S.; LACERDA, C. F. DE; GOMES FILHO, E (ed.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 2.ed. Fortaleza: INCTSal, 2016. Cap.8, p.95-112.

MENDES, W. C.; ALVES JÚNIOR, A.; CUNHA, P. C. R.; SILVA, A. R.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D. Potassium leaching in different soils as a function of irrigation depths. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.20, n.11, p.972-977, 2016.

MOREIRA, F. M. S.; KASUYA, M. C. **Fertilidade e biologia do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2016, 592 p.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, [s. l.], v. 59, p. 651-668, 2008.

NOBREGA, G. N.; ROMERO, D. J.;OTERO, X. L.; FERREIRA, T. O. Pedological studies of subaqueous soils as a contribution to the protection of seagrass meadows in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, 2018.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-537.

OLIVEIRA, J. B. O. **Pedologia aplicada**. 4. ed. Piracicaba, SP: FEALQ, 2011, 592 p. il.

OWEN JR, J. S.; WARREN, S. L.; BILDERBACK, T. E.; ALBANO, J. P. Phosphorus rate, leaching fraction, and substrate influence on influent quantity, effluent nutrient content, and response of a containerized woody ornamental crop. **Hortscience**, [s. l.], v. 43, n. 3, p. 906–912, 2008.

RAINS, D. W.; GOYAL, S. S. Strategies for managing crop production in saline environments: An overview. *In*: GOYAL, S. S.; SHARMA, S. K.; RAINS, D. W.; MORGAN, R. L. (ed.). **Crop production in saline environments: global and integrative perspectives**. New York: The Haworth Press, 2003. p.1-10.

RHOADES, J. D. Drainage for salinity control. *In*: VAN SCHILFGAARDE, J. (Ed.). **Drainage for Agriculture**. Agronomy Monograph No. 17, 1974. p. 433–461.

RHOADES, J. D.; KANDIAH, A. M.; MARSHALI, A. M. **Uso de águas salinas para produção agrícola**. Campina Grande: UFPB. 2000. 117 p.

RIBEIRO, M. R.; FREIRE, F. J.; MONTENEGRO, A. A. Solos halomórficos no Brasil: ocorrência, gênese, classificação, uso e manejo sustentável. *In*: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERMES, L. R. G. G.; LIMA, J. M.; LOPES A. S.; ALVAREZ, V. H. (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v.3, p.165-208.

RIBEIRO, M. R.; RIBEIRO FILHO, M. R.; JACOMINE, P. K. T. Origem e classificação dos solos afetados por sais. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. DA S.; LACERDA, C. F. DE; GOMES FILHO, E (ed.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 2.ed. Fortaleza: INCTSal, 2016. Cap.2, p.9-16.

RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and álcali soils**. Washington: United States Salinity Laboratory, 1954. 160p. USDA, Agriculture Handbook 60.

ROLSTON, D. E.; SCHULBACH, R. S.; PHENE, C. J.; MILLER, R. J.; URIU, K.; CARLSON, R. M.; HANDERSON, D. W. **Applying nutrients and other chemicals to trickle irrigated crops**. Berkeley: University of California, 1979, 14 p.

ROY, E. D.; RICHARDS, P. D.; MARTINELLI, L. A.; COLETTA, L.D.; LINS, S. R. M.; VAZQUEZ, F. F.; WILLING, E.; SPERA, S. A.; VANWEY, L. K.; PORDER, S. The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants**, [s. l.], v. 2, p. 16043, 2016.

ROY, E. D.; WILLIG, E.; RICHARDS, P.D.; MARTINELLI, L.A.; VAZQUEZ, F.F.; PEGORINI, L.; SPERA, S.A.; PORDER, S. Soil phosphorus sorption capacity after three decades of intensive fertilization in Mato Grosso, Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s. l.], v. 249, p. 206-214, 2017.

SANTOS, R.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7. ed. revisada e ampliada. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015, 101 p. il.

SAQIB, M.; AKHTAR, J.; QURESHI, R. H. Sodicy intensity intensifies the effect of salinity on grain yield and yield components of wheat. **Journal of Plant Nutrition**, London, v.31, p. 689-701, 2008.

SHABALA S.; CUIN T. A. Potassium transport and plant salt tolerance. **Physiologia Plantarum**, [s. l.], v.133, p. 651-669, 2008.

SHENKER, M.; BEN-GAL, A.; SHANI, U. Sweet corn response to combined nitrogen and salinity environmental stresses. **Plant Soil**, [s. l.], v. 256, p.139-147, 2003.

SJØGAARD, K. S.; VALDEMARSEN, T. B.; TREUSCH, A. M. Responses of an agricultural soil microbiome to flooding with seawater after managed coastal realignment. **Microorganisms**, [s. l.], v. 6, n. 12, 2018.

SOARES FILHO, W. S.; GHEYI, H. R.; BRITO, M. E. B.; NOBRE, R. G.; FERNANDES, P. D.; MIRANDA, R. S. Melhoramento genético e seleção de cultivares tolerantes à salinidade. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. DA S.; LACERDA, C. F. DE; GOMES FILHO, E (ed.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 2.ed. Fortaleza: INCTSal, 2016. Cap.17, p.259-274.

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**, Campina Grande, v.14, p.705-714, 2010.

SOLOGUREN, L. Demanda mundial cresce e Brasil tem espaço para expandir produção. **Revista Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 13, p. 8-11, 2015.

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

TROEH, F. R.; THOMPSON, L. M. **Solos e fertilidade do solo**. 6.ed. São Paulo: Andrei, 2007. 718p. il.

WANG, L.; PUTNIS, C. V.; HÖVELMANN, J.; PUTNIS, A. Interfacial precipitation of phosphate on hematite and goethite. **Minerals**, [s. l.], v. 8, 207, 2018.

## 5 CONCLUSÕES GERAIS

A determinação da FL por Rhoades (AS) implicou no uso de maiores volumes de água durante o ciclo do milho no intuito de diminuir os efeitos negativos provocado pela salinidade. No entanto, esse incremento na quantidade de água não resultou em diferentes respostas de crescimento e produção da planta quando comparado ao método de determinação da FL pelo balanço hídrico + 15% de FL (BS).

Apesar do uso das frações de lixiviação, foi possível constatar o estresse que o aumento dos níveis de sais provoca na planta. Com o incremento da salinidade da água, observou-se o menor crescimento e produção do milho, bem como as menores concentrações de nitrogênio, fósforo e potássio na cultura.

As lâminas de lixiviação indicadas pelo método de Rhoades, acabaram promovendo a maior lixiviação de nitrogênio e potássio do solo. Esse fenômeno contribuiu para uma menor absorção de potássio pela planta, maior desperdício de água e menor eficiência de utilização da água quando comparado ao balanço hídrico + 15% de FL.

É importante reconhecer que o método de Rhoades para o cálculo da FL pode ser mais vantajoso em culturas consideradas tolerantes à salinidade como por exemplo o algodoeiro (*Gossypium hirsutum*), a beterraba açucareira (*Beta vulgaris*) e a cevada (*Hordeum vulgare*). Porém, no caso de uma cultura moderadamente sensível a salinidade, como o caso do milho, o método de determinação da FL calculado de acordo com o balanço hídrico do solo + 15% de FL apresentou-se como o mais adequado.

## REFERÊNCIAS

- AOAC. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 18. ed. Maryland: AOAC, 2005.
- ASSIS JÚNIOR, J. O.; LACERDA, C. F.; SILVA, F. B.; SILVA, F. L. B.; BEZERRA, M. A.; GHEYI, H. R. Produtividade do feijão-de-corda e acúmulo de sais no solo em função da fração de lixiviação e da salinidade da água de irrigação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 3, p. 702-713, 2007.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **Water quality for agriculture**. FAO Irrigation and Drainage Paper 29. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985. 174 p.
- AZEVEDO NETO, A. D.; TABOSA, J. N. Estresse salino em plântulas de milho: parte II. Distribuição dos macronutrientes catiônicos e suas relações com sódio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, p. 165-171, 2000.
- BAETHGEN, W. E.; ALLEY, M. M. A manual colorimetric procedure for measuring ammonium nitrogen in soil and plant Kjeldahl digests. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v. 20, p. 961-969, 1989.
- BARROS, G. S. C.; ALVES, L. R. A. Maior eficiência econômica e técnica depende do suporte das políticas públicas. **Revista Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 13, p. 4-7, 2015.
- BELTRÁN, J. M. Integrated approach to address salinity problems in irrigated agriculture. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. DA S.; LACERDA, C. F. DE; GOMES FILHO, E (ed.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 2. ed. Fortaleza: INCTSal, 2016. Cap. 1, p.3 – 8.
- BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D.; SOARES, A. A. **Manual de irrigação**. 9. ed., Viçosa: Editora UFV, 2019. 545 p. il.
- BHATLA, S. C.; LAL, M. A. **Plant physiology, development and metabolism**. Singapore: Springer Nature Singapore Pte. Ltd, 2018, 1271 p.
- BIGUELINI, C. P.; GUMY, M. P. Saúde ambiental: índices de nitrato em águas subterrâneas de poços profundos na região sudoeste do Paraná. **Revista Faz Ciência**, Francisco Beltrão, v. 14, n. 20, p. 153-75, 2012.
- BLANCO, F. F.; FOLEGATTI, M.V.; GHEYI, H. R.; FERNANDES, P.D. Growth and yield of corn irrigated with saline water. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 65, n. 6, p. 574-580, 2008.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 704 p. il.



BRAGA, J.M.; DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica do fósforo com extrato de solos e plantas. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 41, p. 73-85, 1974.

BRAZ, R. S.; LACERDA, C. F.; ASSIS JUNIOR, R. N.; FERREIRA, J. F. S.; OLIVEIRA, A. C.; RIBEIRO, A. A. Growth and physiology of maize under water salinity and nitrogen fertilization in two soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 23, n. 12, p. 907-913, 2019.

BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C. M. Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, p. 365-372, 2000.

CAMARGO, F. A. O., SANTOS, G. A.; ZONTA, E. Alterações eletroquímicas em solos inundados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 29, n. 1, p.171-9, 1999.

CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F.; MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizante. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 471-537.

CATALDO, D. A.; HAROON, M.; SCHRADER, L. E.; YOUNGS, V. L. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v. 6, p. 71-80, 1975.

CHEN, W.; HE, Z. L.; YANG, X. E.; MISHA, S.; STOFFELLA, P. J. Chlorine nutrition of higher plants: progress and perspectives. **Journal of Plant Nutrition**, London, v. 33, n. 7, p. 943-952, 2010.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos – safra 2018/19**. v. 6 - Safra 2018/19 - Décimo segundo levantamento, Brasília, v. 6, 2019. 126 p.

CORINGA, E. D. A. O.; COUTO, E. G.; OTERO, X. L.; TORRADO, P. V. Atributos de solos hidromórficos no Pantanal Norte Matogrossense. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 42, n. 1, p. 19–28, 2012.

DIAS, N. S.; BLANCO, F. F.; SOUZA, E. R.; FERREIRA, J. F. S.; NETO, O. N. S.; QUEIROZ, I. S. R. Efeitos dos sais na planta e tolerância das culturas à salinidade. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. DA S.; LACERDA, C. F. DE; GOMES FILHO, E. (ed.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 2.ed. Fortaleza: INCTSal, 2016. Cap.11, p. 151-162.

D'ODORICO, P.; CHIARELLI, D. D.; ROSA, L.; BINI, A.; ZILBERMAN, D.; RULLI, M. C. The global value of water in agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 117, n. 36, p. 21985–21993, 2020.

EMBRAPA. **Cultivo do milho: plantio, espaçamento, densidade, quantidade de sementes**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado Técnico 46,

2002. Disponível em:

[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Comunicadotecnico46\\_000fh4typ3g02wyiv80rn0etns9yxeif.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Comunicadotecnico46_000fh4typ3g02wyiv80rn0etns9yxeif.pdf). Acesso em: 20 jan. 2021

EMBRAPA. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2011, 771 p. il.

EMBRAPA. **Manual de análises de solo**. 3. ed. revisado e ampliado – Brasília, DF, 2017, 574 p.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

EMBRAPA. **Nutrição e adubação do milho**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica 78, 2006. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/490410>. Acesso em: 22 nov. 2017.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solo**. 5. ed. Brasília, DF: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2018. 356 p. il.

FALKENMARK, M.; ROCKSTRÖM, J. **Balancing water for humans and nature: the new approach in ecohydrology**. Sterling, VA: Earthscan, 2004, 247 p.

FAO, 2016. **FAOSTAT**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 19 mar. 2018.

FAROOQ, M.; HUSSAIN, M.; WAKEEL, A.; SIDDIQUE, K. H. M. Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, [s. l.], v. 35, p. 461–481, 2015.

FEIJÃO, A. R.; MARQUES, E. C.; SILVA, J. C. B.; LACERDA, C. F.; PRISCO, J. T.; GOMES-FILHO, E. Nitrato modula os teores de cloreto e compostos nitrogenados em plantas de milho submetidas à salinidade. **Bragantia**, Campinas, v. 72, p. 10-19, 2013.

FENG, G.; ZHANG, Z.; WAN, C.; LU, P.; BAKOUR, A. Effects of saline water irrigation on soil salinity and yield of summer maize (*Zea mays* L.) in subsurface drainage system. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 193, p. 205-213, 2017.

FERREIRA, A. C. B.; ARAÚJO, G. A. A.; PEREIRA, P. R. G.; CARDOSO, A. A. Características agronômicas e nutricionais do milho adubado com nitrogênio, molibdênio e zinco. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, p. 131-138, 2001.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FERREIRA, P. A.; SILVA, B. L.; RUIZ, H.A. Aspectos físicos e químicos de solos em regiões áridas e semiáridas. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. DA S.; LACERDA, C. F. DE;

GOMES FILHO, E (ed.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 2.ed. Fortaleza: INCTSal, 2016. Cap.3, p.17-34.

FREIRE, J. L. O.; CAVALCANTE, L. F.; DIAS T. J.; DANTAS, M. M. M.; MACEDO, L. P. M.; AZEVEDO, T. H. O. Teores de micronutrientes no solo e no tecido foliar do maracujazeiro amarelo sob uso de atenuantes do estresse salino. **Revista Agropecuária Técnica**, Areia, v. 36, p. 65-81, 2015.

FREIRE, J. L. O.; CAVALCANTE, L. F.; REBEQUI, A. M.; DIAS, T. J.; VIEIRA, M. S. Crescimento do maracujazeiro amarelo sob estresse salino e biofertilização em ambiente protegido contra perdas hídricas. **Holos**, Natal, v. 28, p. 55-68, 2012.

GAINES, T. P.; PAKER, M. B.; GASCHO, G. J. Automated determination of chlorides in soil and plant tissue by sodium nitrate extraction. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 76, n. 3, p. 371-374, 1984.

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

GARCIA, G. O.; FERREIRA, P. A.; MIRANDA, G. V.; OLIVEIRA, F. G.; SANTOS, D. B. Índices fisiológicos, crescimento e produção do milho irrigado com água salina. **Irriga**, Jaboticabal, v. 12, n. 3, p. 307-325, 2007.

GARCIA, G. O.; MARTINS FILHO, S.; REIS, E. F.; MORAES, W. B.; NAZÁRIO, A. A. Alterações químicas de dois solos irrigados com água salina. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 39, n. 1, p. 7-18, 2008.

GHEYI, H. R.; DIAS, N. DA S.; LACERDA, C. F. DE; GOMES FILHO, E. **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 2. ed. Fortaleza: INCTSal, 2016. 504p. il.

GOMES, K. R.; AMORIM, A. V.; FERREIRA, F. J.; FILHO, F. L. A.; LACERDA, C. F.; GOMES FILHO, E. Respostas de crescimento e fisiologia do milho submetido a estresse salino com diferentes espaçamentos de cultivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 4, p. 365-370, 2011.

GONZÁLEZ-ROMERO, A.; RUBIO, S. El problema de la planificación hidrológica: una aplicación al caso español. **Revista de Economía Aplicada**, Zaragoza, v.1, p. 33-66, 1993.

HAYNES, R. J. Principles of fertilizer use for trickle irrigated crops. **Fertilizer Research**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 235-255, 1985.

HENG, L. K.; WHITE, R. E.; BOLAN, N. S.; SCOTTER, D. R. Leaching losses of major nutrients from a mole-drained soil under pasture. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, [s. l.], v. 34, n. 3, p. 325-334, 1991. DOI: 10.1080/00288233.1991.10417672

IBGE, 2017. **Resultado da produção agrícola municipal 2016**, disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2013-agencia-de-noticias/releases/16814-pam-2016-valor-da-producao-agricola-nacional-foi-20-maior-do-que-em-2015.html>. Acesso em: 19 mar. 2018.

IPECE- Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Indicadores Econômicos do Ceará 2017**. Fortaleza: IPECE, 2017. 107 p.

JONES JR., J. B .; WOLF, B.; MILLS, H.A. **Plant analysis handbook: a practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide**. Athens: Micro-Macro, 1991. 213 p.

LACERDA, C. F.; CAMBRAIA, J.; CANO, M. A. O.; RUIZ, H. A.; PRISCO, J. T. Solute accumulation and distribution during shoot and leaf development in two sorghum genotypes under salt stress. **Environmental and Experimental Botany**, [s. l.], v. 49, n. 2, p. 107-20, 2003.

LACERDA, C. F.; FERREIRA, J. F. S.; LIU, X.; SUAREZ, D. L. Evapotranspiration as a criterion to estimate nitrogen requirement of maize under salt stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**, [s. l.], v. 202, p. 192-202, 2016.

LACERDA, C. F.; FERREIRA, J. F. S.; SUAREZ, D. L.; FREITAS, E. D.; LIU, X. Evidence of nitrogen and potassium losses in soil columns cultivated with maize under salt stress. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 8, p. 553-557, 2018.

LI, J.; CHEN, J.; QU, Z.; WANG, S.; HE, P.; ZHANG, N. Effects of alternating irrigation with fresh and saline water on the soil salt, soil nutrients, and yield of tomatoes. **Water**, [s. l.], v. 11, 1693, 2019. DOI:10.3390/w11081693.

MAAS, E. V.; HOFFMAN, G. J. Crop salt tolerance - current assessment. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, ASCE 103, 1977, p. 115-134.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MARTINEZ, M. A.; SILVA, J. B. G.; PEREIRA, D. dos R. Modelagem do movimento de sais no solo. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. DA S.; LACERDA, C. F. DE; GOMES FILHO, E (ed.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 2.ed. Fortaleza: INCTSal, 2016. Cap.8, p.95-112.

MENDES, W. C.; ALVES JÚNIOR, A.; CUNHA, P. C. R.; SILVA, A. R.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D. Potassium leaching in different soils as a function of irrigation depths. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 11, p. 972-977, 2016.

MOREIRA, F. M. S.; KASUYA, M. C. **Fertilidade e biologia do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2016, 592 p.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, [s. l.], v. 59, p. 651-668, 2008.

NAZÁRIO, A. Z.; BESTETE, L. O.; GARCIA, G. O.; REIS, E. F.; CECÍLIO, R. A. Desenvolvimento e produção do milho irrigado com água de diferentes condutividades elétricas. **Engenharia Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 2, p.117-130, 2013.

NEVES, A. L. R., LACERDA, C. F.; GUIMARÃES, F. V. A.; HERNANDEZ, F. F. F.; SILVA, F. B.; PRISCO, J. T.; GHEYI, H. R. Acumulação de biomassa e extração de nutrientes por plantas de feijão-de-corda irrigadas com água salina em diferentes estádios de desenvolvimento. **Ciencia Rural**, Santa Maria, v. 39, p. 758-765, 2009.

NOBREGA, G. N.; ROMERO, D. J.;OTERO, X. L.; FERREIRA, T. O. Pedological studies of subaqueous soils as a contribution to the protection of seagrass meadows in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, 2018.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017 p.

OLIVEIRA, J. B. O. **Pedologia aplicada**. 4. ed. Piracicaba, SP: FEALQ, 2011, 592 p. il.

OWEN JR, J. S.; WARREN, S. L.; BILDERBACK, T. E.; ALBANO, J. P. Phosphorus rate, leaching fraction, and substrate influence on influent quantity, effluent nutrient content, and response of a containerized woody ornamental crop. **Hortscience**, [s. l.], v. 43, n. 3, p. 906–912, 2008.

PESSARAKALI, M.; SZABOLCS, I. Soil salinity and sodicity as particular plant/crop stress factors. *In*: PESSARAKALI, M (ed.). **Handbook of plant and crop stress**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1999. p.1-15.

RAINS, D. W.; GOYAL, S. S. Strategies for managing crop production in saline environments: An overview. *In*: GOYAL, S. S.; SHARMA, S. K.; RAINS, D. W.; MORGAN, R. L. (ed.). **Crop production in saline environments: global and integrative perspectives**. New York: The Haworth Press, 2003. p.1-10.

RHOADES, J. D. Drainage for salinity control. *In*: VAN SCHILFGAARDE, J. (Ed.), **Drainage for Agriculture**. Agronomy Monograph No. 17. SSSA, Madison, 1974. p. 433–461.

RHOADES, J. D.; KANDIAH, A. M.; MARSHALI, A. M. **Uso de águas salinas para produção agrícola**. Campina Grande: UFPB, 2000, 117 p.

RIBEIRO, A. A.; LACERDA, C. F.; NEVES, A. L. R.; SOUSA, C. H. C.; BRAZ, R. S.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, J. M. G.; FERREIRA, J. F. S. Uses and losses of nitrogen by maize and cotton plants under salt stress. **Archives of Agronomy and Soil Science**, [s. l.], v. 66, p. 1-14, 2020. DOI: 10.1080/03650340.2020.1779228.

RIBEIRO, M. R.; FREIRE, F. J.; MONTENEGRO, A. A. Solos halomórficos no Brasil: ocorrência, gênese, classificação, uso e manejo sustentável. *In*: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERMES, L. R. G. G.; LIMA, J. M.; LOPES A. S.; ALVAREZ, V. H. (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v.3, p.165-208.

RIBEIRO, M. R.; RIBEIRO FILHO, M. R.; JACOMINE, P. K. T. Origem e classificação dos solos afetados por sais. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. DA S.; LACERDA, C. F. DE; GOMES FILHO, E (ed.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 2.ed. Fortaleza: INCT Sal, 2016. Cap.2, p.9-16.

RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and álcali soils**. Washington: United States Salinity Laboratory, 1954. 160p. USDA, Agriculture Handbook 60.

RISTVEY, A. G.; LEA-COX, J. D.; ROSS, S. D. Nutrient uptake, partitioning and leaching losses from container-nursery production systems. **Acta Horticulturae**, [s. l.], v. 630, p. 321–328, 2004.

ROLSTON, D. E.; SCHULBACH, R. S.; PHENE, C. J.; MILLER, R. J.; URIU, K.; CARLSON, R. M.; HANDERSON, D. W. **Applying nutrients and other chemicals to trickle irrigated crops**. Berkeley: University of California, 1979, 14p.

ROY, E. D.; RICHARDS, P. D.; MARTINELLI, L. A.; COLETTA, L.D.; LINS, S. R. M.; VAZQUEZ, F. F.; WILLING, E.; SPERA, S. A.; VANWEY, L. K.; PORDER, S. The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants**, [s. l.], v. 2, p. 16043, 2016.

ROY, E. D.; WILLIG, E.; RICHARDS, P. D.; MARTINELLI, L. A.; VAZQUEZ, F. F.; PEGORINI, L.; SPERA, S.A.; PORDER, S. Soil phosphorus sorption capacity after three decades of intensive fertilization in Mato Grosso, Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s. l.], v. 249, p. 206-214, 2017.

SANTOS, R. D.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7. ed. revista e ampliada. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015, 101 p. il.

SAQIB, M.; AKHTAR, J.; QURESHI, R. H. Sodicyty intensifies the effect of salinity on grain yield and yield components of wheat. **Journal of Plant Nutrition**, London, v.31, p. 689-701, 2008.

SHABALA S.; CUIN T. A. Potassium transport and plant salt tolerance. **Physiologia Plantarum**, [s. l.], v.133, p. 651-669, 2008.

SHENKER, M.; BEN-GAL, A.; SHANI, U. Sweet corn response to combined nitrogen and salinity environmental stresses. **Plant Soil**, [s. l.], v. 256, p.139-147, 2003.

SINCLAIR, T.R.; TANNER, C. B.; BENNETT, J. M. Water-use efficiency in crop production. **BioScience**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 36-40, 1984.

SJØGAARD, K. S.; VALDEMARSEN, T. B.; TREUSCH, A. M. Responses of an agricultural soil microbiome to flooding with seawater after managed coastal realignment. **Microorganisms**, [s. l.], v. 6, n. 12, 2018.

SOARES FILHO, W. S.; GHEYI, H. R.; BRITO, M. E. B.; NOBRE, R. G.; FERNANDES, P. D.; MIRANDA, R. S. Melhoramento genético e seleção de cultivares tolerantes à salinidade. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. DA S.; LACERDA, C. F. DE; GOMES FILHO, E (ed.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 2. ed. Fortaleza: INCTSal, 2016. Cap.17, p.259-274.

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**, Campina Grande, v. 14, p. 705-714, 2010.

SOLOGUREN, L. Demanda mundial cresce e Brasil tem espaço para expandir produção. **Revista Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 13, p. 8-11, 2015.

SOUZA, L. S. B.; MOURA, M. S. B.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, T. G. F. Eficiência do uso da água das culturas do milho e do feijão-caupi sob sistemas de plantio exclusivo e consorciado no semiárido brasileiro. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 3, p. 715-721, 2011.

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

TROEH, F. R.; THOMPSON, L. M. **Solos e fertilidade do solo**. 6.ed. São Paulo: Andrei, 2007. 718 p. il.

WANG, L.; PUTNIS, C. V.; HÖVELMANN, J.; PUTNIS, A. Interfacial precipitation of phosphate on hematite and goethite. **Minerals**, [s. l.], v. 8, 207, 2018.