

JOSÉ EDSON FLORENTINO DE MORAIS

**USO DE ÁGUAS SALOBRAS E FRAÇÃO DE LIXIVIAÇÃO
NO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

RECIFE - PE
FEVEREIRO DE 2020

JOSÉ EDSON FLORENTINO DE MORAIS

**USO DE ÁGUAS SALOBRAS E FRAÇÃO DE LIXIVIAÇÃO
NO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola (Área de Concentração: Engenharia de Água e Solo).

Orientador: Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva

RECIFE - PE
FEVEREIRO DE 2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo autor

J827u Morais, José Edson Florentino de
Uso de águas salobras e fração de lixiviação no cultivo da cana-de-
açúcar / José Edson Florentino de Morais. – Recife: O autor, 2020.
157f.: il.

Orientador: Ênio Farias de França e Silva.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2020.
Inclui referências.

1. *Saccharum officinarum*. 2. Salinidade. 3. Fração de lixiviação. 4.
Nutrição mineral. 5. Qualidade tecnológica. I. Silva, Ênio Farias de
França e, orientador II. Título.

CDD 630

JOSÉ EDSON FLORENTINO DE MORAIS

Engenheiro Agrônomo

**USO DE ÁGUAS SALOBRAS E FRAÇÃO DE LIXIVIAÇÃO NO CULTIVO DA
CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola (Área de Concentração: Engenharia de Água e Solo).

DEFENDIDA e APROVADA em 28 de fevereiro de 2020.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva – DEAGRI/UFRPE

Presidente/Orientador

Prof. Dr. Gerônimo Ferreira da Silva – DEAGRI/UFRPE

Examinador Interno

Prof. Dr. José Amilton Santos Júnior Silva – DEAGRI/UFRPE

Examinador Interno

Dr. Djalma Euzébio Simões Neto – EECAC/UFRPE

Examinador Interno

Prof. Dr. Alexsandro Oliveira da Silva - DENA/UFC

Examinador Externo

Aos meus avós (*in memoriam*),
 Severiano Sátiro de Moraes, Isaura Florentino de Moraes,
 José Cipriano da Silva e Maria Gomes de Lima que me ensinaram a beleza das palavras
 quando ainda não sabia ler, com muitas de suas histórias, que
 Deus lhes conceda paz de espírito.

Aos meus queridos e amados pais (Agricultores),
 Zacarias Florentino de Moraes e Marina Cipriano de Moraes,
 pelo amor incondicional, por apoiarem minhas decisões e
 nunca medirem esforços para me oferecer à Educação.
 São vocês que alimentam minha vontade para superar os desafios e consolidam o
 alicerce de minha vida.

*“Meus pais não tinham
 Nem escola, nem dinheiro
 Todo dia, o ano inteiro
 Trabalhavam sem parar
 Faltava tudo
 Mas a gente nem ligava
 O importante não faltava
 Seu sorriso, seu olhar”*
 (Utopia, Pe. Zezinho).

DEDICO

As minhas irmãs,
 Elizabeth, Ivani e Suziene,
 aos meus irmãos,
 Enoque, Edilson, Iranildo e Ivan,
 pelo incentivo, carinho e apoio
 nas dificuldades e conquistas ao longo da vida.

Aos meus sobrinhos,
 Robson, Viviane, Valter, Rian, Verônica,
 Henrique, Ana Clara, Giovanna, Wendryus e Isabela, aos quais
 desejo muita saúde, paz e sucesso nos estudos.

Aos demais familiares,
 por proporcionarem tantos momentos de felicidade e pelo apoio.

Aos meus amigos,
 pelas vibrações positivas, incentivo e apoio.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida e pela luz que guia meus passos e minhas decisões em todos os momentos da minha vida. “Direi do Senhor: Ele é o meu Deus, o meu refúgio, a minha fortaleza e Nele confiarei” (Salmos 91:2). Toda honra e glória a Ti.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco pela infraestrutura oferecida e oportunidade de realização dos estudos.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola (PGEA) pela oportunidade de crescimento profissional. A todos os professores que contribuíram com seu conhecimento, em nome dos coordenadores Ênio Farias de França e Silva e Mário Monteiro Rolim. A todos os técnicos, em nome de Nádia Casseiro, muito obrigado pelo apoio.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro para a execução da pesquisa.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade (INCTSal) pelo apoio a pesquisa.

A Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina (EECAC), em nome do coordenador Djalma Euzébio Simões Neto pelo apoio fundamental a pesquisa.

A Usina Petribu, em nome do Grupo Petribu pelo apoio na realização da análise da qualidade tecnológica da cana-de-açúcar.

Ao Professor Ênio Farias de França e Silva, pela orientação, apoio, confiança, pela amizade conquistada, pelos conselhos pessoais e profissionais. Um grande exemplo de profissional que tive a satisfação de encontrar ao longo dessa jornada.

Aos Professores Gerônimo Ferreira da Silva, José Amilton Santos Júnior Silva, Djalma Euzébio Simões Neto e Alessandro Oliveira da Silva por se disporem à avaliação do trabalho e pelas valiosas sugestões para melhoria.

Ao Professor Gerônimo Ferreira da Silva, pelo apoio, conhecimento e experiência partilhados durante à condução da pesquisa e nas análises nutricionais, minha gratidão.

A Professora Raquele Mendes de Lira, pelo apoio, prestatividade e toda experiência despendidos ao longo na pesquisa.

Ao Doutor Breno Leonan de Carvalho Lima, pela valiosa contribuição com sua experiência em análise multivariada.

Ao Doutor Daniel da Costa Dantas, pelo apoio ao longo da pesquisa.

Ao Professor Thieres George Freire da Silva, pela amizade e incentivo na minha formação profissional. Seu apoio e suas palavras me fizeram enxergar mais longe e a alcançar voos cada vez mais altos.

Aos meus colegas e amigos da Família PGEA, pelos momentos de alegria, por me ajudarem a crescer como pessoa e profissional. De modo especial, ao grande amigo Ailton Alves pelo apoio e encorajamento em todos os momentos e conquistas desde a graduação. A Caick Martins, pela amizade e por todos os momentos de descontração. A Keila Jeronimo, amiga e irmã de coração, muito agradecido por todos os momentos, pelo apoio e carinho. A Sirleide Menezes, pelo exemplo de profissional, pela amizade e irmandade conquistadas, por toda motivação, conselhos, conversas, risadas e apoio prestados em laboratório, no campo e ao longo dessa jornada, minha gratidão.

Ao amigo Anízio Godoi Neto, grande profissional que tive a honra de conhecer, aprender e partilhar experiências durante o curso e, principalmente ao longo de grande parte da pesquisa.

Aos bolsistas de iniciação científica, em nome de Weliston Cutrim, Larissa Andrade, Lívia Silva, Antônio Diomescio e Anna Cecília muito obrigado pela amizade, pela dedicação e comprometimento com a pesquisa, desejo-lhes sucesso na vida profissional.

A todos, minha eterna gratidão!

“Quando uma pessoa decide melhorar as suas condições de vida e sabe disciplinar e apontar sua rota com vontade inabalável em direção ao seu objetivo, tudo virá ao seu encontro: bons livros, bons amigos, boas companhias, e meios que a ajudarão a realizar seus desejos.”

(James Allen)

“A principal meta da educação é criar homens que sejam capazes de fazer coisas novas, não simplesmente repetir o que outras gerações já fizeram. Homens que sejam criadores, inventores, descobridores. A segunda meta da educação é formar mentes que estejam em condições de criticar, verificar e não aceitar tudo que a elas se propõe.”

(Jean Piaget)

BIOGRAFIA

JOSÉ EDSON FLORENTINO DE MORAIS - filho de Zacarias Florentino de Moraes e Marina Cipriano de Moraes, nasceu em Princesa Isabel - PB, em 02 de fevereiro de 1989. cursou o ensino médio na Escola Deputado Nominando Muniz Diniz, na cidade de São José de Princesa - PB, concluindo em 2008. Ainda em 2008 foi finalista da 1ª Olimpíadas de Língua Portuguesa – Escrevendo o Futuro. Em março de 2009, ingressou no Curso de Bacharelado em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, na cidade Serra Talhada - PE. Ao longo do curso foi bolsista de iniciação científica durante quatro anos e integrante do GAS – Grupo de Agrometeorologia no Semiárido/NEPPAF – Núcleo de Estudo e Pesquisa em Palma Forrageira, coordenado pelo Dr. Thieres George Freire da Silva. Graduou-se Engenheiro Agrônomo em fevereiro de 2014. Em março de 2014 iniciou a Pós-Graduação no curso de Mestrado em Produção Vegetal pela Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, em Serra Talhada - PE, concluindo em fevereiro de 2016. Em março de 2016 iniciou a Pós-Graduação no curso de Doutorado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal Rural de Pernambuco. Ao longo do curso foi integrante do Grupo de Reúso de Água de Alta Salinidade e Servida e sob orientação do Dr. Ênio Farias de França e Silva concentrou seus estudos na avaliação da performance da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) irrigada sob condições de estresse salino. A defesa da Tese ocorreu em fevereiro de 2020.

Morais, José Edson Florentino de. **Uso de águas salobras e fração de lixiviação no cultivo da cana-de-açúcar**. 2020. 157f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.

RESUMO GERAL

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. O Nordeste apresenta potencial de expansão da área plantada, no entanto, nessa região, a salinização do solo pode comprometer a cultura que é moderadamente sensível a salinidade. Assim, objetivou-se avaliar o crescimento, produtividade, qualidade industrial, estado nutricional, extração e exportação de nutrientes e de sódio pela cana-planta e cana-soca irrigada com águas salobras e condições de lixiviação e a produtividade da cana-ressoca em regime de sequeiro. O estudo foi realizado na Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, em lisímetros de drenagem. Foi avaliada a variedade RB92579 em delineamento inteiramente casualizado: cinco níveis de salinidade da água de irrigação (CEa: 0,5; 2,0; 4,0; 6,0; 8,0 dS m⁻¹) e as condições sem (FL1 = 0) e com fração de lixiviação (FL2 = 0,17), correspondentes a lâminas de 100 e 120% da evapotranspiração. Os níveis salinos foram obtidos pela adição de NaCl e CaCl₂ a água de distribuição local (0,5 dS m⁻¹). Foi avaliado o crescimento da cana-planta e soca; coletada a folha diagnose (folha +3) da cana-planta e cana-soca, para determinação dos teores de macronutrientes, micronutrientes e sódio. Na colheita, foi obtida a produtividade da cana-planta, cana-soca e cana-ressoca; qualidade industrial, extração e exportação dos macronutrientes, micronutrientes e de sódio na cana-planta e cana-soca. A salinidade da água de irrigação reduziu o crescimento, qualidade industrial, teores foliares de macronutrientes e micronutrientes, exceto cálcio, cloreto e sódio na cana-planta e soca. Com exceção do cálcio, cloreto e sódio, a extração e exportação foi reduzida com a salinidade na cana-planta e cana-soca. A ordem de extração e a exportação na cana-planta e cana-soca foi: FL1 (N > K > Ca > Mg > P > S > Fe > Mn > Cl > Na > Zn > Cu) e FL2 (N > K > Mg > Ca > P > S > Fe > Mn > Cl > Na > Zn > Cu). A produção de biomassa reduziu com o aumento da salinidade na cana-planta e soca. A salinidade da água de irrigação da cana-planta e soca promoveu efeito residual na produtividade da ressoca. A fração de lixiviação de 0,17 mitigou os efeitos da salinidade sobre o crescimento, teores nutricionais, produtividade e promoveu maior extração e exportação de nutrientes.

Palavras-chave: *Saccharum* spp., salinidade, nutrição mineral, irrigação, qualidade industrial

Morais, José Edson Florentino de. **Use of brackish water and fraction of leaching in the cultivation of sugarcane.** 2020. 157f. Thesis (Ph.D. in Agricultural Engineering) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

GENERAL ABSTRACT

Brazil is the world's largest producer of sugarcane. The Northeast has the potential for expansion of the planted area, however, in this region, the salinization of the soil can compromise the crop that is moderately sensitive to salinity. Thus, the objective was to evaluate the growth, productivity, industrial quality, nutritional status, extraction and export of nutrients and sodium by the cane-plant and cane-ratoon irrigated with brackish water and leaching conditions and the productivity of the 2nd ratoon under the rainfed regime. The study was carried out at the Federal Rural University of Pernambuco, Recife, using drainage lysimeters. The RB92579 variety was evaluated in a completely randomized design: five levels of irrigation water salinity (ECw: 0.5; 2.0; 4.0; 6.0; 8; 0 dS m⁻¹) and conditions without (FL1 = 0) and with leach fraction (FL2 = 0.17), corresponding to depth of 100 and 120% of evapotranspiration. Saline levels were obtained by adding NaCl and CaCl₂ to the water of local distribution (0.5 dS m⁻¹). The growth of cane-plant and cane-ratoon was evaluated; the diagnosis leaf (leaf +3) of the cane-plant and ratoon was collected to determine the levels of macronutrients, micronutrients, and sodium. At harvest, the productivity of cane-plant, cane-ratoon, and 2nd ratoon was obtained; industrial quality, extraction, and export of macronutrients, micronutrients, and sodium in cane-plant and cane-ratoon. The salinity of the irrigation water reduced the growth, industrial quality, leaf contents of macronutrients, and micronutrients, except calcium, chloride, and sodium in the cane-plant and cane-ratoon. With the exception of calcium, chloride, and sodium, extraction and export were reduced with salinity in the cane-plant and cane-ratoon. The order of extraction and export in cane-plant and cane-ratoon: FL1 (N > K > Ca > Mg > P > S > Fe > Mn > Cl > Na > Zn > Cu) and FL2 (N > K > Mg > Ca > P > S > Fe > Mn > Cl > Na > Zn > Cu). The production of biomass decreased with the increase of salinity in the cane-plant and ratoon. The salinity of the irrigation water of the cane-plant and ratoon promoted a residual effect on the productivity of the 2nd ratoon. The leaching fraction of 0.17 mitigated the effects of salinity on growth, nutritional content, productivity and promoted greater extraction and export of nutrients.

Keywords: *Saccharum* spp., salinity, mineral nutrition, irrigation, industrial quality

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	VIII
CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO GERAL, OBJETIVOS, HIPÓTESES E REVISÃO DE LITERATURA	17
1. INTRODUÇÃO GERAL	18
2. OBJETIVOS	20
2.1. Objetivo Geral.....	20
2.2. Objetivos Específicos.....	20
3. HIPÓTESES	20
4. REVISÃO DE LITERATURA	21
4.1. Cana-de-açúcar: aspectos agronômicos	21
4.1.1 Histórico, aspectos botânicos e taxonômicos.....	21
4.1.2 Aspectos morfológicos e fisiológicos	22
4.1.3 Demanda nutricional	27
4.2. Cana-de-açúcar: aspectos socioeconômicos e ambientais	29
4.2.1 Importância socioeconômica e ambiental	29
4.2.2 Área irrigada de cana-de-açúcar e censo varietal.....	33
4.2.3 Produtos e subprodutos	34
4.3. Qualidade de água para irrigação	36
4.4. Efeitos da salinidade no solo e no crescimento das plantas	39
4.5. Efeitos da salinidade na nutrição mineral das plantas.....	44
4.6. Efeitos da salinidade na qualidade industrial das plantas	46
4.7. Uso da fração de lixiviação para manejo dos sais na agricultura.....	49
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
CAPÍTULO II: CRESCIMENTO, PRODUTIVIDADE E QUALIDADE TECNOLÓGICA DA CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA COM ÁGUAS SALOBRAS E FRAÇÃO DE LIXIVIAÇÃO	69
1. INTRODUÇÃO	72
2. MATERIAL E MÉTODOS	73
2.1. Localização e caracterização da área de estudo	73
2.2. Plantio e manejo da cultura	75
2.3. Delineamento experimental e tratamentos	76
2.4. Manejo de irrigação e balanço hídrico	76
2.5. Avaliação do crescimento	80
2.6. Avaliação da produção de biomassa e qualidade tecnológica	81
2.7. Análise estatística.....	82
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	83

3.1. Análise de crescimento	83
3.2. Qualidade tecnológica e produtividade	92
4. CONCLUSÕES	105
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
CAPÍTULO III: ESTADO NUTRICIONAL, EXTRAÇÃO E EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA COM ÁGUAS SALOBRAS E FRAÇÃO DE LIXIVIAÇÃO	
1. INTRODUÇÃO	114
2. MATERIAL E MÉTODOS	115
2.1. Localização e caracterização da área de estudo	115
2.2. Manejo da cultura e tratamentos	116
2.3. Análise nutricional (teores de macronutrientes, micronutrientes e sódio).....	119
2.4. Análise nutricional (exportação e extração de macronutrientes, micronutrientes e sódio) e produção de biomassa	120
2.5. Análise estatística.....	120
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	121
3.1. Estado nutricional (teores de macronutrientes, micronutrientes e sódio)	121
3.2. Análise nutricional (exportação e extração de macronutrientes, micronutrientes e sódio).....	136
3.3. Produção de biomassa (Massa verde da parte aérea e produtividade de colmos)	150
4. CONCLUSÕES	152
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO GERAL, OBJETIVOS, HIPÓTESES E REVISÃO DE LITERATURA.....	17
Figura 1. Fases fenológicas da cana-de-açúcar. Fonte: Adaptado de Gascho & Shih (1983) e Nakano (2011).....	22
Figura 2. Produtos e subprodutos do setor sucroenergético no Brasil. Fonte: Adaptado de Santos et al. (2020).....	35
Figura 3. Mapa global de solos globais afetados por sal, por tipo e severidade. Fonte: Adaptado de FAO (2011) e Wicke et al. (2011).....	40
CAPÍTULO II: CRESCIMENTO, PRODUTIVIDADE E QUALIDADE TECNOLÓGICA DA CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA COM ÁGUAS SALOBRAS E FRAÇÃO DE LIXIVIAÇÃO.....	69
Figura 1. Balanço hídrico decendial durante os ciclos de cana-planta (A), cana-soca (B) e cana-ressoca (C).....	79
Figura 2. Superfície de resposta da altura do colmo (AC) da cana-de-açúcar submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com fração de lixiviação (FL2) para cana-planta (A e B) e cana-soca (C e D), respectivamente.....	84
Figura 3. Superfície de resposta do diâmetro do colmo (DC) da cana-de-açúcar submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com fração de lixiviação (FL2) para cana-planta (A e B) e cana-soca (C e D), respectivamente.....	86
Figura 4. Superfície de resposta do número de plantas (NP) da cana-de-açúcar submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com fração de lixiviação (FL2) para cana-planta (A e B) e cana-soca (C e D), respectivamente.....	88
Figura 5. Superfície de resposta da área foliar (AF) da cana-de-açúcar submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com fração de lixiviação (FL2) para cana-planta (A e B) e cana-soca (C e D), respectivamente.....	89
Figura 6. Superfície de resposta do índice de área foliar (IAF) da cana-de-açúcar submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com fração de lixiviação (FL2) para cana-planta (A e B) e cana-soca (C e D), respectivamente.....	91

Figura 7. Teor de sólidos solúveis no caldo ($^{\circ}$ Brix) e índice de maturação (IM) na cana-planta (A) e soca (B), correspondentes ao tratamento irrigado com água de abastecimento ($CEa = 0,5 \text{ dS m}^{-1}$) e sob a sem fração de lixiviação (FL1).....	92
Figura 8. Teor de sólidos solúveis no caldo ($^{\circ}$ Brix) (A e B), teor de sacarose no caldo (Pol_{caldo}) (C e D) e teor de sacarose na cana (Pol_{cana}) (E e F) na cana-planta e soca, respectivamente, submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.....	96
Figura 9. Pureza do caldo (PZA) (A) e açúcares redutores totais do caldo (AR_{caldo}) (B) na cana-soca submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.....	99
Figura 10. Açúcares totais recuperáveis (ATR) (A e B) e produtividade de colmos (TCH) (C e D) na cana-planta e soca, respectivamente, estimativa de produtividade média de cinco cortes (TCH_5) (E) submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação; produtividade de colmos (TCH) (F) da ressoca sob regime de sequeiro.....	100
Figura 11. Rendimento bruto de açúcar (RBAÇ) (A e B) e rendimento bruto de etanol (RBET) (C e D) na cana-planta e soca, respectivamente, submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação....	103

CAPÍTULO III: ESTADO NUTRICIONAL, EXTRAÇÃO E EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA COM ÁGUAS SALOBRAS E FRAÇÃO DE LIXIVIAÇÃO.....

Figura 1. Precipitação (P), evapotranspiração de referência acumulada (ET_o), evapotranspiração da cultura acumulada correspondente a 100 (FL1 = 0) e 120% da ETC (FL2 = 0,17).....	118
Figura 2. Teores de Nitrogênio (N) (A e B), Fósforo (P) (C e D), Potássio (K) (E e F) na cana-planta e soca, respectivamente, submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.	123
Figura 3. Teores de Cálcio (Ca) (A e B), Magnésio (Mg) (C e D), Enxofre (S) (E e F) na cana-planta e soca, respectivamente, submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.....	127
Figura 4. Teores de Cobre (Cu) (A e B), Ferro (Fe) (C e D), Manganês (Mn) (E e F) na cana-planta e soca, respectivamente, submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.....	130

Figura 5. Teores de Zinco (Zn) (A e B), Cloreto (Cl) (C e D), Sódio (Na) (E e F) na cana-planta e soca, respectivamente, submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.....134

Figura 6. Massa verde da parte aérea (A e B) e produtividade de colmos (C e D) na cana-planta e soca, respectivamente, submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.....151

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO GERAL, OBJETIVOS, HIPÓTESES E REVISÃO DE LITERATURA.....	17
Tabela 1. Extensão de solos afetados por sais, por tipo e severidade.....	28
Tabela 2. Faixas de teores de nutrientes no terço médio da folha +3 da cana-de-açúcar considerados adequados.....	39
CAPÍTULO II: CRESCIMENTO, PRODUTIVIDADE E QUALIDADE TECNOLÓGICA DA CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA COM ÁGUAS SALOBRAS E FRAÇÃO DE LIXIVIAÇÃO.....	69
Tabela 1. Atributos físico-químicos e hídricos do Espodossolo Humilúvico.....	75
Tabela 2. Valores do Kc para cana-de-açúcar.....	77
Tabela 3. Resumo da análise de variância para teor de sólidos solúveis no caldo ($^{\circ}$ Brix), teor de sacarose no caldo (Pol_{caldo}), teor de sacarose na cana (Pol_{cana}), pureza do caldo (PZA), açúcares redutores totais do caldo (AR_{caldo}), teor de fibras (F), açúcares totais recuperáveis (ATR), produtividade de colmos (TCH), rendimento bruto de açúcar (RBAÇ), rendimento bruto de etanol (RBET) em cana-planta e soca sob níveis de salinidade da água de irrigação e condições de lixiviação.....	93
CAPÍTULO III: ESTADO NUTRICIONAL, EXTRAÇÃO E EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA COM ÁGUAS SALOBRAS E FRAÇÃO DE LIXIVIAÇÃO.....	111
Tabela 1. Resumo da análise de variância para os teores foliares de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), cloreto (Cl) e sódio (Na) em cana-planta e soca sob diferentes níveis de salinidade da água de irrigação e condições de lixiviação.....	121
Tabela 2. Resumo da análise de variância para extração de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), cloreto (Cl) e sódio (Na) em cana-planta e cana-soca sob diferentes níveis de salinidade da água de irrigação e condições de lixiviação.....	136
Tabela 3. Extração de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), cloreto (Cl) e sódio (Na) em cana-planta sob diferentes níveis de salinidade da água de irrigação e	

condições de lixiviação.....	138
Tabela 4. Extração de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), cloreto (Cl) e sódio (Na) em cana-soca sob diferentes níveis de salinidade da água de irrigação e condições de lixiviação.....	144
Tabela 5. Resumo da análise de variância para exportação de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), cloreto (Cl) e sódio (Na) em cana-planta e cana-soca sob diferentes níveis de salinidade da água de irrigação e condições de lixiviação.....	145
Tabela 6. Exportação de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), cloreto (Cl) e sódio (Na) em cana-planta sob diferentes níveis de salinidade da água de irrigação e condições de lixiviação.....	147
Tabela 7. Exportação de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), cloreto (Cl) e sódio (Na) em cana-soca sob diferentes níveis de salinidade da água de irrigação e condições de lixiviação.....	149

CAPÍTULO I

**INTRODUÇÃO GERAL, OBJETIVOS, HIPÓTESES E REVISÃO DE
LITERATURA**

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO GERAL, OBJETIVOS, HIPÓTESES E REVISÃO DE LITERATURA

1. INTRODUÇÃO GERAL

A grande demanda mundial por energias limpas e renováveis tem incentivado a busca por bioenergia e gestão no uso da água no setor agrícola. O Brasil apresenta grande potencial bioenergético, sendo o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), um dos principais “commodities” agrícolas. A cultura apresenta capacidade de aproveitamento de resíduos e a utilização de etanol como combustível renovável, reduzindo o impacto ambiental do sistema de produção, além da geração de emprego movimentando uma parcela importante na economia.

A produção de cana na safra 2018/2019 no Brasil foi de aproximadamente 620,44 milhões de toneladas em 8,59 milhões de hectares, correspondentes a 33,25 e 34,74% do total mundial, respectivamente, com grande contribuição das lavouras do Nordeste em função da recuperação devido à melhoria das condições climáticas (CONAB, 2019).

Na maioria dos estados produtores da região Nordeste, onde o clima é predominantemente semiárido, grande parte da produção se concentra em áreas costeiras. Nessas áreas, além dos baixos índices pluviométricos, a má distribuição espaço-temporal torna necessária a prática de irrigação complementar ou de salvação para obtenção de rendimentos satisfatórios. Segundo Medeiros et al. (2016) a água utilizada na irrigação nessa região, principalmente nos tabuleiros costeiros apresenta em grande parte alto teor de sais, nos açudes de pequeno e médio porte (superficiais) quanto nos poços (subterrâneas).

A salinização pode ocorrer de forma natural (salinização primária), pelo intemperismo das rochas, deposição de sais oriundos dos oceanos pela ação das chuvas e dos ventos ou por ações antrópicas (salinização secundária), principalmente pelo manejo inadequado de fertilizantes inorgânicos e da irrigação (RICHARDS, 1954; RIBEIRO et al., 2016; MUNNS, 2016).

O estresse salino é um dos maiores problemas abióticos que causam diminuição na produção e rendimento de culturas, devido a seus efeitos prejudiciais para as plantas pelos desequilíbrios bioquímicos, fisiológicos e nutricionais (PATADE et al., 2011;

SHOMEILI et al., 2011; JAMES et al., 2012; PLAZEK et al, 2013; MUNNS & GILLIHAM, 2015).

De acordo com Munns (2011) um dos principais problemas causados pela salinização do solo é a redução do potencial osmótico da solução do solo e a acumulação excessiva de certos íons no sistema radicular das plantas que podem causar distúrbios no balanço de íons e toxicidade. Nessas condições, o metabolismo vegetal é alterado e a abertura dos estômatos é reduzida, assim como também a fotossíntese e a translocação de nutrientes alterando o seu potencial de produção.

A cultura da cana-de-açúcar apresenta salinidade limiar de $1,7 \text{ dS m}^{-1}$ e é classificada como moderadamente sensível a salinidade (MAAS, 1984). Nas fases iniciais, tais como germinação e na planta jovem, os sintomas do estresse são mais severos e nestas fases a planta apresenta maior sensibilidade. A salinidade reduz crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, resultando na baixa qualidade da matéria prima final, principalmente a redução do conteúdo de sacarose nos colmos (SENGAR et al., 2013; GUERZONI et al., 2014).

Assim, tecnologias que promovam o manejo adequado dos recursos hídricos e do solo são necessárias para que o problema da salinização de áreas agrícolas não venha agravar-se e, assim, manter a sustentabilidade dos cultivos. De acordo com Zhang et al. (2019) uma das técnicas utilizadas para controle de sais no solo é o uso da fração de lixiviação, que consiste na aplicação no ato da irrigação de uma lâmina de água além da necessidade da cultura, para que os sais, provenientes da água de irrigação e/ou presentes no solo sejam lixiviados da zona radicular, permitindo bons rendimentos de produção das culturas.

Apesar dos relatos científicos relacionados aos benefícios da irrigação na cana-de-açúcar no aumento do rendimento, ainda são escassos os trabalhos avaliando a resposta da cultura a ambiente salino, e, principalmente quando associada a técnicas como a fração de lixiviação para mitigar os efeitos da salinidade nas plantas. Além disso, são poucos trabalhos realizados no Brasil e/ou com variedades recentemente disponibilizadas aos produtores.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar o crescimento, a produtividade, a qualidade tecnológica e o balanço nutricional da cultura da cana-de-açúcar planta e cana-soca irrigada com águas salobras e condições sem e com fração de lixiviação e a produtividade da cana-ressoca em regime de sequeiro.

2.2 Objetivos Específicos

Avaliar os efeitos do estresse salino nos parâmetros de crescimento (altura e diâmetro do colmo, número de plantas, área foliar, índice de área foliar, massa fresca e seca da parte aérea) da cana-de-açúcar planta e soca sob irrigação com águas salobras e condições de lixiviação.

Analisar os efeitos do estresse salino na qualidade tecnológica (teor de sólidos solúveis no caldo, teor de sacarose no caldo e na cana, pureza do caldo, açúcares reductores totais do caldo, teor de fibras, açúcares totais recuperáveis, produtividade de colmos, rendimento bruto de açúcar e rendimento bruto de etanol) da cana-de-açúcar planta e soca sob irrigação com águas salobras e condições de lixiviação.

Analisar o balanço nutricional através da quantificação do teor, extração e exportação de macronutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre), micronutrientes (ferro, manganês, cobre, zinco e cloreto) e sódio da cana-de-açúcar planta e soca sob irrigação com águas salobras e condições de lixiviação.

Avaliar a produtividade da cana-ressoca em regime de sequeiro.

3. HIPÓTESES

O crescimento, produtividade, qualidade tecnológica, teor e acúmulo de nutrientes da cana-de-açúcar são afetados pelas águas salobras e condições de lixiviação, sendo sua resposta diferente de acordo com os níveis de salinidade aplicados das águas.

O emprego da fração de lixiviação no cultivo da cana-de-açúcar reduz os efeitos da salinidade nas variáveis analisadas com o uso da água de irrigação com nível salino acima da salinidade limiar tolerada pela cultura.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. Cana-de-açúcar: aspectos agronômicos

4.1.1 Histórico, aspectos botânicos e taxonômicos

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é originária da ilha de Papua, na Nova Guiné, onde além de crescer em meio silvestre, era utilizada como planta ornamental nos jardins e moradias, seu cultivo iniciou-se há mais de 10.000 anos a.C.. Por volta de 1.000 anos a.C. a cultura se expandiu juntamente com as migrações náuticas dos habitantes do Oceano Pacífico, disseminando-se em várias ilhas do sul do Pacífico, na Indochina, no Arquipélago da Malásia e em Bengala. No século IX, os primeiros relatos do processo de produção e fabricação de açúcar na Índia (MIRANDA, 2008; ÚNICA, 2019).

Por volta de 1493 houve a introdução da cana-de-açúcar nas Américas, na segunda viagem de Cristovão Colombo, levando os colmos de cana-de-açúcar para regiões como a República Dominicana (FIGUEIREDO, 2008). No Brasil, as primeiras mudas da cultura (variedades Criola e Caiana) provenientes da Ilha da Madeira e Açores, em Portugal chegaram por volta de 1532, trazidas por Martin Afonso de Souza. As condições ambientais similares aquelas de onde foram trazidas, impulsionou a formação dos primeiros engenhos açucareiros, sendo fundado o primeiro engenho de açúcar brasileiro na capitania de São Vicente, hoje Baixada Santista, litoral de São Paulo. Em 1535, Jerônimo de Albuquerque implantou o primeiro engenho de açúcar no Nordeste, em Olinda, Pernambuco (MOZAMBANI et al., 2006; ÚNICA, 2019).

A cana-de-açúcar pertencente à família Poaceae, classe Liliopsida, subclasse Commelinidae, ordem Cyperales e gênero *Saccharum* foi descrita taxonomicamente, pela primeira vez, por Linnaeus, em 1753, no livro “*Species Plantarum*” (HITCHCOCK, 1923). A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma planta monocotiledônea, alógama e semiperene, seus atuais cultivares são híbridos interespecíficos, sendo que nas constituições genéticas participam as espécies *S. officinarum*, *S. spontaneum*, *S. sinense*, *S. barberi*, *S. robustum* e *S. edule* (GUPTA et al., 2010).

Trata-se de uma planta de reprodução sexuada; porém, quando cultivada comercialmente é multiplicada assexuadamente, por propagação vegetativa (CAIEIRO et al., 2010). É caracterizada pela inflorescência do tipo panícula, flor hermafrodita, caule em crescimento cilíndrico composto de nós e entrenós, e folhas alternas, opostas,

presas aos nós dos colmos, com lâminas de sílica em suas bordas e bainha aberta (MILLER & GILBERT, 2009; JADOSKI et al., 2010).

4.1.2 Aspectos morfológicos e fisiológicos

A cana-de-açúcar, segundo Gascho & Shih (1983) e Nakano (2011), apresenta quatro diferentes sub-períodos ou estádios em sua fenologia (Figura 1), conhecidos por: brotação e emergência dos brotos (colmos primários); perfilhamento e estabelecimento da cultura (da emergência dos brotos ao final do perfilhamento); período do grande crescimento (do perfilhamento final ao início de acumulação da sacarose), e Maturação (intensa acumulação de sacarose nos colmos).

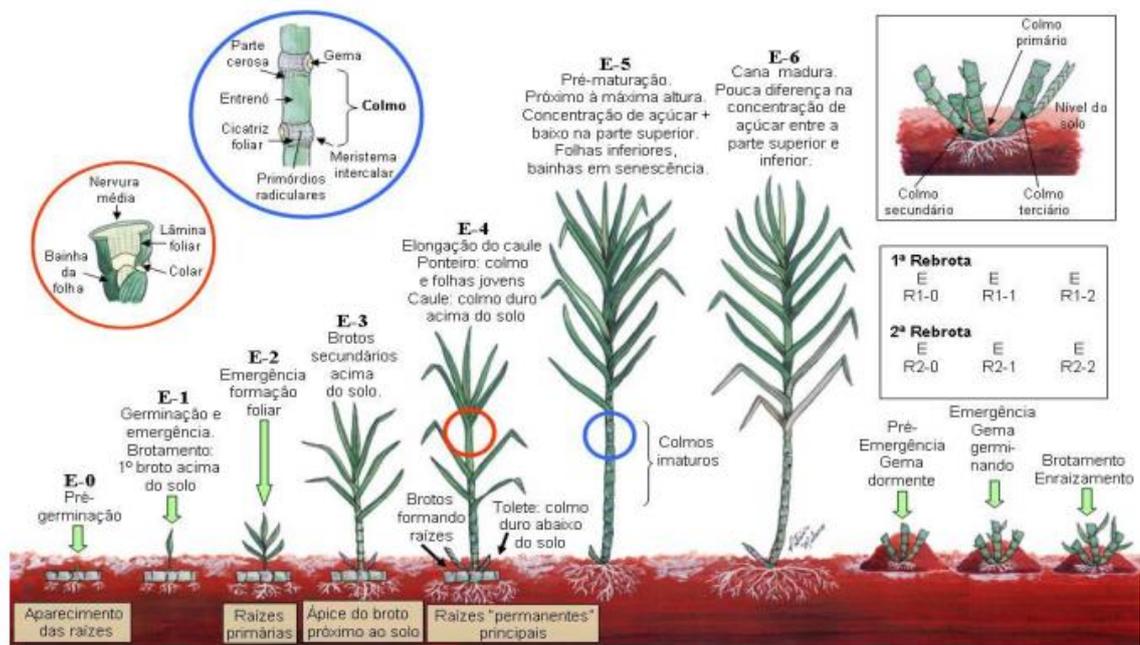


Figura 1. Fases fenológicas da cana-de-açúcar. Fonte: Adaptado de Gascho & Shih (1983) e Nakano (2011).

Na produção de cana-de-açúcar, as sementes têm importância em programas de melhoramento genético, o sucesso desses programas é dependente da obtenção de sementes de qualidade fisiológica superior (CAIEIRO et al., 2010). A semente botânica de cana-de-açúcar é na realidade um fruto, do tipo cariopse com coloração marrom, forma elíptica, com aproximadamente 1,5 mm de comprimento por 0,5 mm de diâmetro (LUCCHESI, 2000). Dentre os fatores ambientais que interferem na

germinação destaca-se a água como o principal fator no início da germinação (LEE, 1984).

De acordo com Cesnik & Miocque (2004), a temperatura ideal para a germinação das sementes encontra-se na faixa de 25 a 32 °C, as temperaturas mais baixas, ao redor de 18,5 °C inibem a sua germinação. Em plantios comerciais, a cana-de-açúcar é propagada principalmente de forma vegetativa por meio da brotação de suas gemas. O plantio é realizado por meio de pedaços de colmo, contendo uma ou mais gemas. A brotação sofre forte influência com a temperatura ambiente, sendo a faixa ótima de 28 a 30°C, e paralisa quando a temperatura é inferior a 20°C.

Após 20 a 30 dias se inicia a emergência do perfilho primário na superfície do solo e, simultaneamente ao seu crescimento, a partir da base do colmo, observa-se o desenvolvimento de novas raízes e o desenvolvimento de outros perfilhos (SEGATO et al., 2006). Após sua emissão, inicia-se o crescimento e desenvolvimento das raízes dos perfilhos, que tem por finalidade absorver água e nutrientes do solo, não dependendo mais das reservas do tolete (BEZUIDENHOU et al., 2003).

Segundo Câmara (1993) esse estágio fenológico (perfilhamento) permitirá o estabelecimento da cultura em condições de campo e fornecerá às touceiras o número de colmo adequados a produção. A fase de perfilhamento intenso das touceiras ocorre quando atingem o máximo da produção de novos perfilhos, chegando algumas variedades a produzir 20 ou mais por touceira. A partir do ponto máximo, a competição entre perfilhos pelos fatores de crescimento (luz, espaço, água e nutrientes) torna-se elevada, de maneira que se constata a redução do perfilhamento através da diminuição e paralização desse processo, além de morte dos perfilhos mais jovens (CASTRO & CHRISTOFOLETTI, 2005).

A formação e crescimento dos perfilhos, diâmetro e número de entrenó são favorecidos pelo aumento da temperatura até o máximo de 30 °C (LIU et al., 1998). O estresse hídrico também pode causar redução na emissão de novos perfilhos, pois a falta de água cessa a divisão e o alongamento celular impedindo a diferenciação e o crescimento dos tecidos que darão origem as novas estruturas dos perfilhos. Durante o período de perfilhamento a cultura exige uma grande quantidade de água para que ocorra o seu pleno estágio de desenvolvimento vegetativo (BEZUIDENHOU et al., 2003).

O perfilhamento começa a partir de cerca de 40 dias após o plantio e pode atingir pico em cerca de 3 a 5 meses sob condições ambientais favoráveis. Com a estabilização

desse estágio, os perfilhos que estão mais desenvolvidos continuam o crescimento em altura e espessura (BEZUIDENHOU et al., 200; ALMEIDA et al., 2008). Nesse período a evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar atinge os valores máximos (GAVA et al., 2011).

As folhas constituem-se os órgãos assimiladores da cana-de-açúcar, e surgem a partir do meristema apical de cada colmo, formada de lâmina e bainha. O número de folhas por colmo é pequeno em plantas jovens e aumenta à medida que o colmo cresce, atingindo um número máximo de 10 ou mais folhas por colmo, dependendo da variedade e condições de crescimento (MILLER & GILBERT, 2009). O estágio de desenvolvimento das folhas ocorre ao mesmo tempo que o perfilhamento e alongação do colmo, coincidindo com o período de maior desenvolvimento da cultura (BEZUIDENHOUT et al., 2003).

O crescimento das plantas depende da conversão da energia luminosa e energia química, cuja intensidade é proporcional à interceptação capturada da luz pelo dossel da cultura (SMIT & SINGELS, 2006). Bezuidenhout et al. (2003) sugerem três fases fenológicas para a parte aérea da cana-de-açúcar em relação ao desenvolvimento do dossel: fase 1 de emergência da parte aérea primária que coincide com o período de desenvolvimento de perfilhos primários, os quais surgem a partir de gemas ou brotos subterrâneos; a fase 2 de emergência da parte aérea secundária, definida como a continuação do desenvolvimento de perfilhos primário e estabelecimento dos perfilhos secundários. E por último a fase 3 de senescência foliar que ocorre devido à competição por luz pelos perfilhos.

A eficiência de crescimento da cultura é determinada pela quantidade de radiação solar interceptada e sua conversão em matéria seca, sendo a eficiência de seu uso no processo de fotossíntese o principal motor da acumulação de biomassa (SINCLAIR et al., 2004; HEERDEN et al., 2010). A produção da cultura da cana-de-açúcar está diretamente relacionada ao desenvolvimento da área foliar, altura e quantidade de colmos por unidade de área.

O aumento do índice de área foliar em cana-de-açúcar é rápido, ocorrendo durante três a cinco meses do seu cultivo (INMAN-BAMBER, 2004). Estudos mostram que a área foliar da cana-de-açúcar aumenta no período de grande crescimento da cultura, quando se verificam os maiores índices de área foliar e números de folhas nesse período, ou seja, alta eficiência fotossintética (SINCLAIR et al., 2004). Ainda de acordo com os autores, com o passar do tempo a capacidade fotossintética da cana-de-açúcar

decrece, representada pela diminuição da área foliar, pois a planta está também mantendo outros órgãos que demandam energia, e que são chamados de drenos, como os colmos, raízes e folhas velhas.

Os colmos que sobrevivem à forte competição da fase de perfilhamento intenso continuam seus processos de crescimento e desenvolvimento, acumulando cada vez mais sacarose em seus entrenós, à medida que estes vão amadurecendo. O colmo é considerado o fruto agrícola da cana-de-açúcar, constitui-se num reservatório, órgão de armazenamento dos fotoassimilados (sacarose) (INMAN-BAMBER et al., 2009), apresenta uma estrutura cilíndrica, é ereto, fibroso e constituído de nós e entrenós; a altura varia de 1,0 a 5,0 m e o diâmetro pode variar desde menos de 1,0 cm até 5,0 cm (MILLER & GILBERT, 2009).

Uma sucessão de entrenós em diferentes estádios fisiológicos compõe o colmo, isto é, entrenós maduros, em maturação e imaturos. Os entrenós imaturos, localizados na região do colmo com folhas verdes, são fibrosos, com alta concentração de hexose e baixa concentração de sacarose (INMAN-BAMBER et al., 2009). À medida que estes entrenós se desenvolvem sua taxa de crescimento diminui progressivamente, até ser nula, quando os entrenós amadurecem (HEERDEN et al., 2010). Ocorre nessa fase a perda de umidade do colmo que é equilibrado por ganho de sacarose e de fibras, o amadurecimento prossegue da parte inferior para a parte superior, portanto, a inferior contém mais açúcares do que na parte superior (LISSON et al., 2005).

As cultivares modernas de cana-de-açúcar, sob condições ideais, são capazes de armazenar sacarose nos tecidos do parênquima do caule até 62% do peso seco (Moore, 2005). A cana-de-açúcar em função do seu ciclo perene sofre influência das variações climáticas durante todo ano. Para atingir alta produção de sacarose a planta precisa de temperatura e umidade adequadas para permitir o máximo crescimento na fase vegetativa, seguida de restrição hídrica ou térmica para favorecer o acúmulo da sacarose no colmo na época do corte (INMAN-BAMBER & SMITH, 2005).

Por ser uma planta do tipo C4, possui alta eficiência fotossintética a ponto luminoso elevado (TAIZ et al., 2017). Na fotossíntese ocorre à produção de carboidratos que serão utilizados primeiramente para o desenvolvimento de folhas e raízes, em seguida os carboidratos são cada vez mais divididos entre matéria seca estrutural e acúmulo na forma de açúcares no colmo (McCORMICK et al., 2008).

O florescimento é uma característica genética da cana-de-açúcar, que forma uma panícula aberta tipo inflorescência. A inflorescência consiste de um eixo principal com

ramificações primárias e secundárias onde estão as espiguetas arranjadas em pares que contêm as flores hermafroditas individuais (MILLER & GILBERT, 2009). Embora essa seja uma característica desejável sob o ponto de vista do melhorista, trata-se de um fenômeno indesejável em áreas comerciais, uma vez que nos processos de formação e emissão da inflorescência ocorre elevado consumo de sacarose e redução do volume do caldo resultando no aumento do teor de fibras (ARALDI et al., 2010). A cana-de-açúcar é considerada termossensível, sendo a indução floral favorecida por temperaturas mínimas acima de 18 °C e temperaturas máximas abaixo de 31°C (LEVI, 1983).

A cultura é cultivada em regiões tropicais e subtropicais de mais de 90 países, difundida em uma ampla faixa de latitude de 35 °N e 30 °S, adaptando-se a diversas condições de clima e solo, exigindo precipitações pluvial entre 1500 a 2500 mm por ciclo vegetativo (DOOREMBOS & KASSAM, 1979).

Segundo Irvine (1983) os rendimentos dos três países com maior incidência solar (Austrália, Colômbia e África do Sul) revelam uma média de peso fresco da cana de 84 Mg ha⁻¹ (ano), sendo obtidos ainda um rendimento máximo comercial de 148 Mg ha⁻¹ (ano) e um máximo experimental foi de 212 Mg ha⁻¹ (ano). Diversos trabalhos estimam esse potencial teórico máximo da cana-de-açúcar através de modelagem, com destaque a Waclawovsky (2010), cujo rendimento teórico máximo foi de 380 Mg ha⁻¹ e Moore (2009) chegou a 472 Mg ha⁻¹. Mesmo que esses potenciais não sejam plenamente alcançados na prática, eles oferecem uma ideia da dimensão da defasagem tecnológica hoje existente, na última safra 2018/2019, por exemplo, segundo a CONAB (2019) a produtividade média do Brasil foi de 72,23 Mg ha⁻¹.

Apesar de a área ser ainda reduzida, segundo informações da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro, uma das cultivares de cana-de-açúcar (RB92579) plantadas na Usina Agrovale, na Bahia, em área de 60 ha sob irrigação plena, atingiu produtividade de 260 Mg ha⁻¹ em 13 meses, considerado um recorde mundial de máxima produtividade em área comercial; ainda observaram na Fazenda Busato, Bom Jesus da Lapa, na Bahia um máximo experimental de 299 Mg ha⁻¹ (RIDESA, 2015). Os altos índices de produtividade comercial na Agrovale foram alcançados em áreas onde se pratica a maior tecnologia de precisão, notadamente no que se refere à utilização de sistemas de irrigação localizados e aplicação de nutrientes via fertirrigação.

4.1.3 Demanda nutricional

O principal meio para o crescimento das plantas é o solo, uma vez que é por meio dele que as plantas obtêm os nutrientes essenciais de que necessitam para completar seu ciclo de vida. Quando o solo não é capaz de suprir as exigências nutricionais haverá redução do crescimento e de produção das culturas (MALAVOLTA et al., 1997; RAIJ, 2011). A exigência nutricional de uma cultura refere-se à quantidade de nutrientes extraídos do solo, do adubo e do ar e acumulados pelas plantas para atender suas necessidades e completar seu ciclo de vida, variando de acordo com a cultivar, manejo do solo, ciclo da cultura e dos nutrientes disponíveis para o desenvolvimento da cultura (MALAVOLTA et al., 1997; MALAVOLTA, 2006; EPSTEIN & BLOOM, 2006; BENETT et al., 2013).

Segundo Faquin (2002) a análise química do solo, certamente, é a principal ferramenta para o diagnóstico da fertilidade do solo e estabelecimento da necessidade de correção e adubação das culturas. Os tecidos das plantas, por sua vez, mostram o seu estado nutricional num dado momento, de modo que a análise dos tecidos aliada à análise do solo permite um diagnóstico mais eficiente do estado nutricional da cultura e das necessidades de alterações no programa de adubação a fim de corrigir possíveis deficiências ou toxidez.

A avaliação do estado nutricional das plantas visa à identificação dos nutrientes que estariam restringindo o crescimento e produção das culturas. A técnica consiste na comparação de uma planta, uma população de plantas ou uma amostra dessa população com um padrão da cultura em questão. O padrão seria uma planta "normal", sem nenhuma limitação do ponto de vista nutricional e capaz de altas produções (MALAVOLTA et al., 1997).

Os padrões nutricionais podem ser obtidos experimentalmente através de plantas cultivadas em condições controladas de nutrição não sofrendo restrições quanto à quantidade e proporção dos nutrientes que recebem ou em condições de campo apresentando alta produtividade (CANTARUTTI et al., 2007). Existem diversos métodos para avaliação do estado nutricional das plantas, sendo os principais a diagnose visual e a diagnose foliar (MALAVOLTA et al., 1997; FAQUIN, 2002; RAIJ, 2011).

Segundo Malavolta et al. (1997) a análise foliar é bastante utilizada, pois as folhas têm atividades metabólicas elevadas e apresentam, em sua composição de nutrientes, as mudanças que ocorreram naquela planta, algumas mudanças podem ser

observadas na coloração das folhas. Na cultura da cana-de-açúcar, a folha +3 é a que melhor representa o estado nutricional da planta, conforme valores citados na Tabela 1.

Tabela 1. Faixas de teores de nutrientes no terço médio da folha +3 da cana-de-açúcar considerados adequados

Autores	Macronutrientes					
	N	P	K	Ca	Mg	S
	-----g Kg ⁻¹ -----					
Malavolta et al. (1997)*	19-21	2,0-2,4	11-13	8,0-10	2-3	2,5-3,0
Malavolta et al. (1997)**	20-22	1,8-2,0	13-15	5-7	2,0-2,5	2,5-3,0
Cavalcanti et al. (2008)	16	1,2	12	4	2	2
Prezotti & Guarçoni (2013)	18-25	1,5-3,0	10-16	2-8	1-3	1,5-3,0
Autores	Micronutrientes					
	B	Cu	Fe	Mn	Zn	
	-----mg Kg ⁻¹ -----					
Malavolta et al. (1997)*	15-50	8-10	200-500	100-250	25-50	
Malavolta et al. (1997)**	-	8-10	80-150	50-125	-	
Cavalcanti et al. (2008)	10	6	100	50	10	
Prezotti & Guarçoni (2013)	10-30	6-15	40-250	30-300	10-50	

Faixas de teores: *cana-planta e **soqueira.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Segundo Amaral et al. (2011) é importante ressaltar que o conhecimento dos teores de nutrientes em vários órgãos do vegetal permite inferir sobre as exigências metabólicas desenvolvidas em cada compartimento, fornecendo base para o entendimento dessas variações e suas implicações nas respostas dos vegetais.

Devido sua elevada produção de biomassa, a cana retira do solo e aloca na planta uma grande quantidade de nutrientes (OLIVEIRA et al. 2007). Assim, pesquisas que visem a quantificação e a alocação de nutrientes nos compartimentos da parte aérea da cana-de-açúcar são necessárias e fornecerão informações sobre a ciclagem de nutrientes nos canaviais, servindo como suporte para a agroindústria sulcrocroleira, que poderá introduzir novos métodos e formas de adubação mais eficazes, com menos desperdício e economicamente mais viáveis (OLIVEIRA et al., 2011).

A extração é a quantidade total de nutrientes que a planta exige para seu desenvolvimento completo, a exportação é a quantidade de nutrientes que está contida no colmo e não volta mais para o solo através do processo de reciclagem de nutrientes (MALAVOLTA, 2006).

De acordo com Coelho & Verlengia (1973), até o quinto mês de idade a absorção de nutrientes pela cana-de-açúcar é pequena, aumentando intensamente daí em

diante, chegando ao nono mês contendo 50% de potássio, cálcio e magnésio e um pouco mais de 30% de nitrogênio, fósforo e enxofre do total que absorve durante o ciclo vegetativo; do nono ao décimo segundo mês a absorção de nitrogênio é ainda mais intensa, acumulando 90% do total extraído pela planta; o fósforo é absorvido durante todo ciclo da planta.

Coelho & Verlengia (1973) citam em sua pesquisa, que para cada tonelada de massa fresca, a cana extrai cerca de 1,32 kg de N, 0,17 kg de P, 1,33 kg de K, 0,19 kg de Ca, 0,31 kg de Mg, 0,12 kg de S, 0,00003 kg de Fe, 0,00002 kg de Mn, e 0,0048 kg de Zn (Ordem decrescente de extração: N > K > Mg > Ca > P > S > Zn > Fe > Mn). Orlando Filho (1983) relatam acúmulo da ordem de 1,43 kg de N, 0,19 kg de P, 0,17 kg de K, 0,87 kg de Ca, 0,49 kg de Mg, 0,44 kg de S, 0,0023 kg de B, 0,0033 kg de Cu, 0,007 kg de Fe, 0,0024 kg de Mn e 0,0059 kg de Zn (K > N > Ca > Mg > S > P > Fe > Mn > Zn > Cu > B). Oliveira et al. (2010) avaliando a extração e a exportação de macronutrientes por 11 variedades de cana sob irrigação plena no município de Carpina - PE obtiveram para cada tonelada de colmo produzida uma extração de 0,91 kg de N; 0,13 kg de P; 1,67 kg de K; 1,15 kg de Ca; 0,45 kg de Mg (K > Ca > N > Mg > P).

4.2. Cana-de-açúcar: aspectos socioeconômicos e ambientais

4.2.1 Importância socioeconômica e ambiental

Atualmente, a cultura da cana-de-açúcar se destaca pelos seus produtos altamente comercializáveis, sendo considerada uma das principais “commodities” agrícolas mundiais (CONAB, 2019). A grande demanda mundial por energias limpas e renováveis tem incentivado a expansão da cultura que se destaca por apresentar capacidade de renovação, devido ao aproveitamento de resíduos, geração de combustível renovável e elevada taxa de fixação de CO₂ atmosférico reduzindo o impacto ambiental do sistema de produção, sendo um componente significativo da economia de muitos países nos trópicos e subtropicais (UNICA, 2019; YASAR et al., 2019).

Mais de 100 países cultivam a cana-de-açúcar, em uma área de aproximadamente 25,83 milhões de hectares - correspondente a cerca de 0,5% da área total mundial usada para agricultura - gerando uma produção de cerca de 1,79 bilhões de toneladas. Cerca de 80% da produção encontra-se concentrada em dez países: Brasil,

Índia, China, México, Tailândia, Paquistão, Colômbia, Austrália, Indonésia e Estados Unidos (FAO, 2019).

O açúcar foi um dos principais pilares do desenvolvimento do Brasil, configurando, desde a época colonial, elemento diferenciado nas relações com o mundo. O etanol passou a ser utilizado como combustível a partir do século XX, até então, o consumo se dava basicamente com bebidas destiladas. Na década de 1930, já se utilizava o álcool anidro (99,3% por volume) para adicioná-lo à gasolina em proporções distintas, de acordo com a região, objetivando estabilizar o preço do açúcar no mercado interno, mas sem regulamentação para seu uso (BORDONAL et al., 2018).

Em 1933, foi criado o Instituto do Açúcar e do Álcool (IAA), principal símbolo da intervenção governamental no país. O IAA centralizava as operações de exportação brasileira sendo a única instituição autorizada a comprar açúcar no mercado doméstico e a estabelecer contratos de exportação, concessão de subsídios aos produtores, principalmente aos da região Norte-Nordeste e do estado do Rio de Janeiro (BORDONAL et al., 2018). De acordo com Simões Neto (2009) os trabalhos com melhoramento genético no Brasil tiveram início na década de 40, gerando bons genótipos, os quais foram substituindo cultivares importados de outros centros internacionais de pesquisa.

Na primeira grande crise mundial do petróleo, ocorrida em 1973 o país importava cerca de 80% de sua necessidade de consumo. Para enfrentar essa crise, o governo federal idealizou três programas: a substituição do diesel, do óleo combustível e da gasolina por outras fontes internas de energia. O Programa Nacional do Álcool (Proálcool) foi criado em 1975, com a função de regulamentar o uso do álcool anidro misturado à gasolina em todo o país, para reduzir a importação de óleo cru e conter, dessa forma, uma crise no balanço de pagamentos (BORDONAL et al., 2018).

Com o Proálcool, o governo lançou uma grande operação de financiamento, contando com recursos do Banco Mundial, o que possibilitou o aumento das áreas plantadas com cana-de-açúcar. As usinas de açúcar existentes receberam financiamentos para instalar aparelhos de destilarias maiores, ao mesmo tempo em que foram criadas as destilarias autônomas - unidades de produção voltadas exclusivamente para a produção de etanol.

O Programa Nacional do Álcool apresentou várias vantagens em relação ao uso de derivados de petróleo, em especial no que se refere ao desenvolvimento tecnológico,

à estratégia de abastecimento, ao desempenho da economia, ao nível de emprego e à preservação do meio ambiente.

O IAA, por meio do seu Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-açúcar PLANALSUCAR passou a desenvolver a partir da década de 70, em suas diversas Coordenadorias Regionais, um programa de melhoramento genético em nível nacional, coroado com a obtenção de excelentes variedades da sigla RB (República do Brasil) (SIMÕES NETO, 2009).

No início da década de 90, com a extinção do IAA, as Universidades Federais assumiram a retomada da pesquisa canavieira, mediante a instituição de Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (RIDESA) que, através do seu Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar (PMGCA) deu continuidade ao Programa de sigla RB (SIMÕES NETO, 2009). Ainda de acordo com o autor, em Pernambuco, em 1991, a Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), adotou a pesquisa canavieira conduzida pela Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC).

O agronegócio representa cerca de 21,70% do PIB do Brasil, sendo a cadeia produtiva da cana (insumos, atividades primárias, indústria e serviços) responde por cerca de 10% desse PIB e 2,17% do PIB do país, ultrapassando a cifra R\$ 150 bilhões em 2017. A agroindústria canavieira vem ampliando sua oferta de produtos e subprodutos, sendo responsável por 5% do saldo da balança comercial brasileira entre 2012 e 2018 (IBGE, 2018; UNICA, 2019).

Segundo a UNICA (2019), somados os empregos diretos e indiretos gerados pelo setor, temos cerca de 2,4 milhões de pessoas empregadas na cadeia produtiva. Esses empregos estão distribuídos em 370 unidades produtoras e nos mais de 70 mil fornecedores independentes.

O Estado de São Paulo é o maior produtor com 51,53% (4,43 milhões de hectares), seguido por Goiás com 10,68% (917,07 mil hectares), Minas Gerais com 9,87% (848,00 mil hectares), Mato Grosso do Sul com 7,54% (647,40 mil hectares), Paraná com 6,63% (569,10 mil hectares), Alagoas com 3,41% (293,20 mil hectares), Pernambuco com 2,69% (231,31 mil hectares) e Mato Grosso com 2,67% (228,9 mil hectares). Esses oito estados são responsáveis por 95,02% da produção nacional. Os outros 13 estados produtores representam apenas 4,98% da área total do país (CONAB, 2019).

O Brasil é o maior produtor e exportador de açúcar do mundo, com 38,6 milhões de toneladas produzidas e 27,8 milhões de toneladas exportadas na safra 2017/2018, quantias equivalentes a 20% produção global e 45% da exportação mundial, respectivamente. O consumo per capita de açúcar no país é de 52 Kg por habitante ano, sendo muito superior à média mundial que é de 22 Kg. O país ainda é o segundo maior produtor e exportador global de etanol (ranking liderado pelos Estados Unidos), com volume de 27,9 bilhões de litros (UNICA, 2019).

Ainda de acordo com a UNICA (2019), o volume de etanol anidro e hidratado produzido em 2018 foi responsável por cerca de 40% da energia consumida pelos veículos leves (ciclo Otto) no Brasil. O consumo de etanol hidratado, combinado à mistura de 27% de etanol anidro na gasolina, reduziu a emissão de gases de efeito estufa (GEE) em mais de 520 milhões de toneladas de CO_{2eq} de 2003 a 2018. Esse volume equivale a soma das emissões anuais da Argentina, Chile, Colômbia e Equador. Em 2018, a biomassa da cana gerou 26,60 TWh, abaixo apenas do total produzido pelas hidrelétricas (380,91 TWh), térmicas a gás (56,45 TWh) e eólicas (33,49 TWh). É primeira fonte de energia renovável do País, sendo responsável por 17,0% da matriz nacional ou 42,91% da energia renovável ofertada (EPE, 2018).

O Brasil destaca-se no cenário mundial por seu potencial agrícola, ocupando atualmente a posição de maior produtor mundial de cana-de-açúcar. Atualmente, o setor sucroalcooleiro brasileiro tem vivenciado uma série de crescimento contínuo, impulsionado pela crescente demanda no mercado interno e externo.

De acordo com a CONAB (2019) na safra 2018/2019 a área colhida no país foi de 8,59 milhões de hectares o que gerou uma produção de 620,44 milhões de toneladas de colmos, correspondentes a 33,25 e 34,74% do total mundial, respectivamente. Para safra de 2019/2020, a expectativa é de aumento na área plantada (2,40%) e na produção (0,30%), principalmente em decorrência da melhoria das condições climáticas no Norte-Nordeste.

A região Norte-Nordeste tem uma participação importante na geração de açúcar e etanol, representando com onze estados 8,71 e 6,65% do total do país, respectivamente (CONAB, 2019). Do volume total de etanol produzido na região, 36,05% (775,32 milhões de litros) foi destinado ao etanol anidro e 59,15% (1,27 bilhões de litros) ao etanol hidratado. Em Pernambuco, a safra 2018/2019 gerou uma produção de 11,33 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, representando 1,84% do total produzido no país e produtividade de 49,40 toneladas por hectare, média bem abaixo da

nacional que foi de 72,23 toneladas por hectare. Essa produção gerou como derivados 732,8 mil toneladas de açúcar e 431,89 milhões litros de etanol, correspondentes a 2,52 e 1,33% do total produzido no país. No estado o consumo per capita de açúcar é de 38,1 kg hab ano⁻¹.

Em Pernambuco, nota-se a concentração da produção na região da Zona da Mata Sul, Norte e Metropolitana de Recife. Em resumo, a Região da Mata Sul, que compreende 24 municípios, é responsável pela produção de 38,80% do total no estado, a Região da Mata Norte, com 19 municípios é responsável por outros 37,80% e as regiões Metropolitana e Agreste correspondem a 15,61% e 7,79%, respectivamente (UNICA, 2019). De acordo com a CONAB (20119) a colheita manual predomina no estado, sendo correspondente a 95,7%, principalmente devido as condições topográficas.

4.2.2 Área irrigada de cana-de-açúcar e censo varietal

A região Nordeste do Brasil abrange uma área de 1,56 milhões de km² (18,27% do território nacional), deste total, 61,68% corresponde ao Semiárido que é caracterizado principalmente pela irregularidade na distribuição espaço-temporal das chuvas que se encontram entre 280 a 800 mm de média anual (ARAÚJO, 2011; INMET, 2019).

Historicamente a região é grande produtora de cana-de-açúcar, sendo a maior parte dos cultivos localizados nos tabuleiros costeiros do Litoral e Agreste, região de clima mais ameno e com maiores precipitações que o Sertão. Na região semiárida, sob condições irrigadas, a cultura apresenta destaque de produtividade com média de 91 toneladas de colmos por hectare (OLIVEIRA et al., 2016).

Segundo a ANA (2017) a cana-de-açúcar é a cultura agrícola com maior área irrigada no Brasil, pois dos 6,95 milhões de hectares irrigados no País, 2,07 milhões é com a cultura da cana o que corresponde a 29,51% da área total de canaviais. A fertirrigação feita exclusivamente com água de reúso (vinhaça e águas residuárias), está presente em 79,50% da área irrigada (1,65 milhões ha) de cana-de-açúcar e as áreas que recebem a irrigação, apenas com água ou consorciada com água de reúso, correspondem a 36,18% (749 mil ha).

Na região Norte-Nordeste 51,65% (456,43 mil ha) dos canaviais algum tipo de irrigação, sendo o estado de Alagoas o que apresenta o maior percentual de área de

cana-de-açúcar irrigada (75%), seguida da Paraíba (54%) e Pernambuco com apenas 15%, no entanto, e com alto potencial de uso dessa prática em novas áreas 9ANA, 2017).

O Instituto Agrônomo de Campinas, através do Programa Cana IAC, criou em abril de 2016 o Censo Varietal IAC, visando levantar informações sobre as variedades utilizadas em todas as unidades produtoras do Brasil. No levantamento varietal realizado na safra de 2016/2017 por Braga Júnior et al. (2018) houve participação de 276 unidades produtoras totalizando 6,97 milhões de hectares (72% da área total cultivada), destacando as seis variedades mais utilizadas: RB867515 (25,8%), RB92579 (9,3%), RB966928 (8,2%), SP81-3250 (7,4%), RB855453 (4,5%) e IACSP95-5000 (1,71%). Na região Norte-Nordeste, as principais variedades foram: RB92579 (35,9% da área total cultivada), RB867515 (14,8%), VAT90-212 (7,8%), SP81-3250 (6,2%) e SP79-1011 (6,1%).

Em relação a região Norte-Nordeste, os autores do censo destacam os cultivos altamente concentrados em uma única variedade, como no caso da RB92579, aumenta significativamente o risco biológico. Em Pernambuco o censo abrangeu 8 unidades produtoras e mais de 106 mil hectares com cana-de-açúcar, sendo as principais variedades da respectiva safra: RB92579 (29,3%), SP78-4764 (15,2%), RB867515 (13,9%), SP79-1011 (6,9%), SP81-3250 (5,8%) e RB931011 (4,5%).

De modo geral, os resultados do Censo Varietal IAC 2016/2017 mostraram que as variedades RB ocupam 68% dos canaviais do País, chegando em algumas regiões a representar áreas superiores a 75%. Segundo a RIDESA (2015) as expressivas elevações das áreas colhidas destas variedades pelas empresas nordestinas, devem-se principalmente, às suas produtividades agroindustriais, de 30% a 40% acima das outras variedades que eram mais cultivadas, com média acima de 80 Mg ha⁻¹ em sequeiro e de 140 Mg ha⁻¹ sob irrigação plena.

4.2.3 Produtos e subprodutos

De modo geral, em todas as regiões produtoras, a cana-de-açúcar tem se destacado pela importância social, econômica e ambiental, fornecendo matéria-prima à indústria sucroalcooleira para a produção de vários produtos e subprodutos: álcool (hidratado e anidro), açúcar (cristal, demerara/VHP, refinado), produção de bebidas (cachaça, aguardente, licor, rum, vodka e etc.), bioplástico, papel, biodiesel, querosene,

fertilizantes, palhada, bagaço, melação, vinhaça, entre outros (TOPPA et al., 2010; TARUMOTO et al., 2015; CONAB, 2019; UNICA, 2019).

Como descrito anteriormente, a biomassa da cana-de-açúcar também pode ser utilizada para cogeração de energia elétrica. A torta de filtro (material orgânico sólido obtido da produção de açúcar) tem sido usada na adubação dos canaviais juntamente com a vinhaça (resíduo da destilação do caldo para obtenção do etanol), rica em N, P e K e que antes era lançada diretamente nos rios. A levedura (rica em proteínas, vitaminas e sais minerais) quando gerada em excedente, é vendida como ração para alimentação animal. O melação (matéria prima para etanol) é o derivado principal, sendo também utilizado na produção de proteína, rações e levedura prensada para panificação. Além disso, outros subprodutos tem ganhado destaque como o etanol de segunda geração (etanol produzido da quebra da celulose).

Santos et al. (2020) realizaram um estudo dos principais produtos, subprodutos e perspectivas de produtos derivados a partir da biomassa da cana-de-açúcar. Na Figura 2, pode-se observar o fluxograma que resume o levantamento realizado pelos autores.

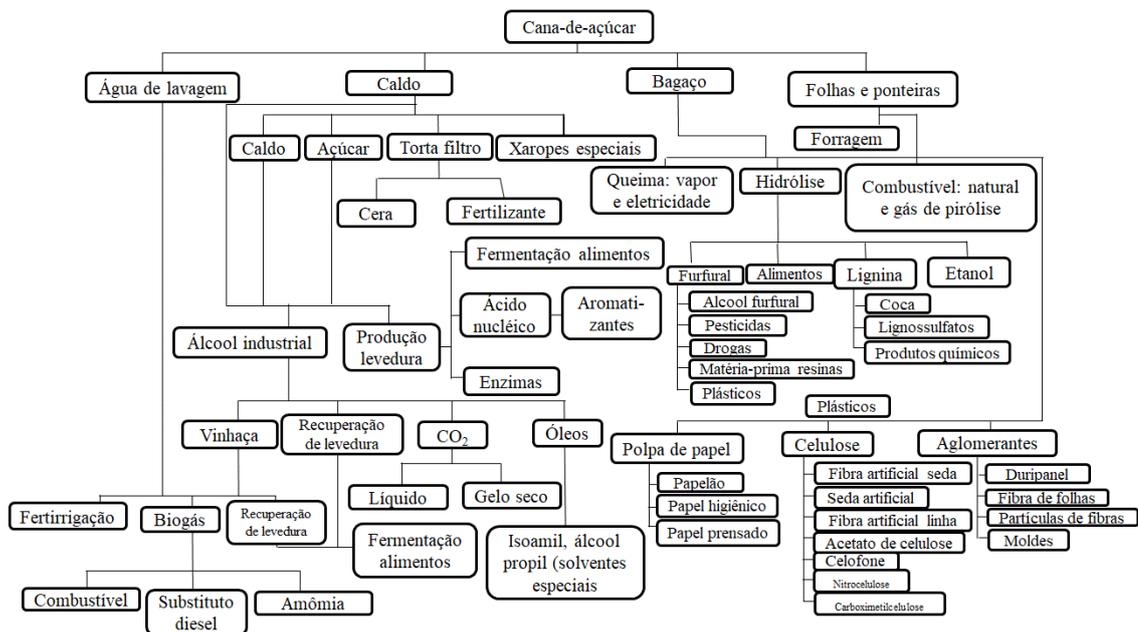


Figura 2. Produtos e subprodutos do setor sucroenergético no Brasil. Fonte: Adaptado de Santos et al. (2020).

4.3. Qualidade de água para irrigação

A água é um componente indispensável à vida, a saúde, o desenvolvimento econômico e o meio ambiente sustentável e considerada uma das maiores forças a exercer influência sobre o clima na terra. As características químicas, físicas e biológicas da água podem variar em função da região de ocorrência e, sua utilização em projetos de irrigação é sinônimo de desenvolvimento e prosperidade em várias regiões agricultáveis do mundo (ALMEIDA, 2010; HOLANDA et al., 2016). Atualmente, a situação hídrica é preocupante, pela quantidade de recursos hídricos disponíveis, e, principalmente, pela qualidade.

A maneira com que os recursos terrestres e hídricos são usados são essenciais é um dos principais desafios para melhorar e garantir a segurança alimentar em todo o mundo. Pressões demográficas, mudanças climáticas e aumento da competição por terras e água tem aumentado a vulnerabilidade de alguns países, particularmente na África e na Ásia e à insegurança alimentar (HANIN et al., 2016; FAO, 2019). A população mundial continua aumentando, atualmente são 7 bilhões de pessoas, segundo a FAO (2019) prevê-se 9 bilhões em 2050, conseqüentemente, à demanda por alimentos.

O aumento crescente na demanda por alimentos e com a incorporação de novas áreas de produção em zonas úmidas e sub-úmida, a humanidade se vê compelida a utilizar a irrigação para complementar as chuvas nestas zonas, como também para fazer produtivas as zonas áridas e semiáridas do globo. A produção de cultivos nestas regiões é dependente de um abastecimento adequado de água em quantidade suficiente, qualidade apropriada e facilmente disponível para a irrigação ao longo da temporada para suprir as necessidades dos cultivos (ALMEIDA et al., 2010; HANIN et al., 2016; FAO, 2019).

As águas utilizadas para irrigação normalmente são de origem superficial ou subterrânea, sendo que todas advém de chuvas, que vão incorporando as substâncias que dissolve ou arrasta dos terrenos pelos quais escorrem ou infiltram, além de receber os resíduos provenientes das atividades humanas. Estas águas continentais, apresentam características muito diversas, dependendo de sua procedência e do grau de contaminação alcançado antes do uso (ALMEIDA et al, 2010).

Segundo Almeida et al. (2010) as águas superficiais continentais englobam, principalmente, as procedentes de rios e lagos, sendo as águas dos rios as mais

utilizadas na agricultura. Os rios percorrem a superfície da terra exercendo uma ação importante de erosão, transporte e sedimentação de materiais, incorporando a seu leito águas procedentes de drenagens naturais, águas de infiltração e drenagem das terras irrigadas e despejos e restos procedentes de atividades humanas, agrícolas e industriais. No curso da água, o conteúdo salino e o grau de contaminação vão aumentando à medida que avança o percurso.

Já as águas subterrâneas infiltram através da superfície e enchem os espaços vazios dos interstícios das rochas, podendo ser extraídas mediante a construção de poços. A concentração de sais depende principalmente da natureza das rochas que formam o aquífero e dos processos de contaminação. Nos poços situados perto da influência de algum rio à medida que as extrações são mais volumosas e, portanto, intensas, a água vai assumindo uma composição cada vez mais semelhante à água do rio. Nos poços situados junto ao mar, a água doce se encontra flutuando sobre a água do mar que enche permanentemente os espaços porosos dos estratos adjacentes, desse modo, quando as extrações são muito intensas se pode chegar a esgotar a capa de água doce e bombear a procedente do mar (ALMEIDA et al., 2010; COSTA SOBRINHO, 2014).

As águas utilizadas para irrigação devem ser em quantidade e qualidade adequada aos cultivos (AYERS & WESTCOT, 1999). Com o aumento na demanda pela produção de alimentos o consumo hídrico tem aumentado, logo tem-se a necessidade de utilizar-se fontes alternativas de água, muitas vezes caracterizadas como águas de qualidade inferior para atividade agrícola (RHOADES et al., 2000; GHEYI et al., 2016), estas águas geralmente são os esgotos, particularmente os de origem doméstica, águas de drenagem agrícola e águas salobras.

De acordo com a Resolução 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, no artigo 2 para efeito desta Resolução são adotadas as seguintes definições:

- I - águas doces: águas com salinidade igual ou inferior a 0,5‰ (500 mg L⁻¹);
- II - águas salobras: águas com salinidade superior a 0,5‰ e inferior a 30‰ (500-30000 mg L⁻¹);
- III - águas salinas: águas com salinidade igual ou superior a 30‰ (30000 mg L⁻¹)

De acordo com Holanda et al. (2016), em torno de 30% das águas avaliadas em diferentes estados do Nordeste brasileiro, que abrange a região semiárida, são de baixa

qualidade para irrigação, e que mesmo áreas irrigadas com águas de baixa a média salinidade, o que ocorre nos perímetros irrigados do Nordeste, apresentam problema de acumulação de sais no solo, em consequência do manejo inadequado da irrigação.

Segundo Rhoades (1972) as águas de irrigação podem conter de 0,1 a 4,0 Mg de sais por mil metros cúbicos e, como geralmente, se aplicam ao solo anualmente de 10 a 15 mil metros cúbicos por hectare, são aportados ao solo de 1,0 a 60,0 toneladas de sal por hectare, Em condições adequadas de drenagem e volumes de chuvas e/ou irrigação esses sais serão lixiviados e eliminados da zona radicular. Quando o aporte de água não é suficiente, o conteúdo em sais do solo aumenta progressivamente até alcançar níveis que fazem antieconômica sua exploração.

No tocante a concentração dos principais sais, Medeiros (1992) verificou que nas principais fontes de água disponíveis para irrigação no Nordeste brasileiro, de maneira geral, há predominância de cloreto (Cl), sódio (Na), cálcio (Ca) e magnésio (Mg). Da mesma forma, Kovda (1973) observaram que os principais sais presentes nos solos e águas do semiárido nordestino são o cloreto de sódio (NaCl), o sulfato de magnésio (MgSO₄), o sulfato de sódio (Na₂SO₄), cloreto de cálcio (CaCl₂), cloreto de magnésio (MgCl₂) e o carbonato de sódio (Na₂CO₃).

Segundo Almeida (2010), os principais parâmetros a serem avaliados na qualidade da água para irrigação contemplam os parâmetros físico-químicos e biológicos, que definem sua adequação ou não para o uso. Ainda segundo esse autor, geralmente os principais atributos analisados são: pH, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, e íons, como sódio, potássio, cálcio, magnésio, cloretos, sulfatos, carbonatos e bicarbonatos.

Segundo Holanda et al. (2016), as águas que se destinam a irrigação devem ser avaliadas principalmente sob três aspectos: riscos de salinidade, problemas com infiltração de água no solo e toxicidade de íons específicos, parâmetros fundamentais na determinação da qualidade agrônômica das mesmas. O efeito da salinidade é de natureza osmótica e reduz a absorção de água pelas plantas, afetando diretamente o rendimento das culturas. A sodicidade se refere ao efeito relativo do sódio da água de irrigação tendendo a elevar a porcentagem de sódio trocável no solo (PST), com danos nas suas propriedades físico químicas, provocando problemas de infiltração. A toxicidade, diz respeito aos efeitos de toxidez pelo excesso de Cl, Na e Boro sobre as

plantas, afetando o rendimento, independente do efeito osmótico. Em algumas situações, o efeito iônico pode se manifestar na forma de desequilíbrio nutricional.

4.4. Efeitos da salinidade no solo e no crescimento das plantas

A salinização do solo é o resultado da acumulação de sais no solo, aumentando o potencial osmótico, o que impede ou dificulta, a captação de água por parte da planta e ainda origina alterações na absorção não seletiva de nutrientes. De acordo com a definição padrão, solos salinos são aqueles que possuem uma condutividade elétrica (CE) do extrato de pasta de solo de saturação superior a 4 dS m^{-1} a $25 \text{ }^\circ\text{C}$, o que corresponde a aproximadamente 40 mM de NaCl e gera uma pressão osmótica de aproximadamente $0,2 \text{ MPa}$ (MUNNS & TESTER, 2008). Quando cultivadas em solos com um valor de CEes acima de 4 dS m^{-1} , as culturas reduzem significativamente sua produção.

Segundo a FAO (2011) e Wicke et al. (2011) a área total de terras afetadas por sal no mundo é estimada em mais de 1.128 milhões de hectares (ha), o que representa mais de 7% da área total do mundo (Tabela 2 e Figura 3). Dos 230 milhões de ha de terras irrigadas, 45 milhões de ha (19,5%) já foram danificados pelo sal pelo manejo inadequado de água e sais na irrigação. No Brasil, o percentual estimado varia entre 20 e 25% sendo a região Semiárida a mais atingida.

Tabela 2. Extensão de solos afetados por sais, por tipo e severidade

Nível de severidade	Unidade	Tipo			Total	(%)
		Salino	Sódico	Salino-Sódico		
Baixa	1000 ha	606	124	6	735	65
Moderada	1000 ha	69	147	11	228	20
Alta	1000 ha	4	13	36	52	5
Extrema	1000 ha	4	5	105	113	10
Total	1000 ha	663	288	157	1128	
	(%)	60	26	14		

Fonte: Adaptado de FAO (2011) e Wicke et al. (2011).

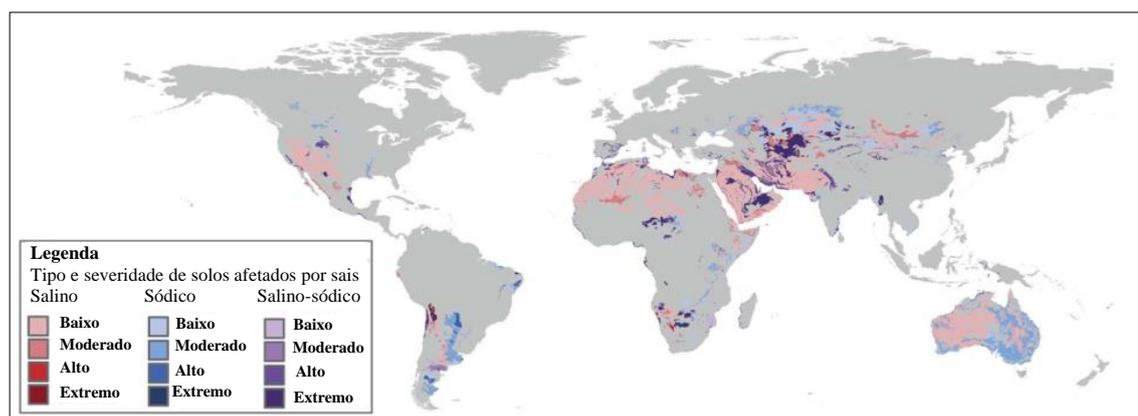


Figura 3. Mapa global de solos afetados por sal, por tipo e severidade. Fonte: Adaptado de FAO (2011) e Wicke et al. (2011).

As regiões semiáridas possuem altas taxas de evaporação, baixos volumes de precipitação pluvial concentradas em poucos meses do ano dificultando a produção agrícola (ALADOS et al., 2011; GUIMARÃES et al., 2016). Nessas regiões as águas subterrâneas são as principais fontes que garantem as necessidades de produção de alimentos, sendo em torno de 70% da água utilizada na agricultura (KALAVROUZOTIS et al., 2010; GHODRATI & GHAZARYAN, 2013). Essas águas se localizam, em sua grande maioria, no embasamento rochoso, ou seja, um conjunto de rochas sedimentares e cristalinas (GENHUA & RAUL, 2010).

Além das condições edafoclimáticas, que contribuem para os elevados níveis de sais nas fontes subterrâneas, em áreas litorâneas é comum a presença de águas salobras, que aliado ao excesso de exploração da irrigação, acarreta numa extração superior a recarga natural e, conseqüentemente, intrusão salina, ou seja, avanço da água salgada do mar em relação ao continente aumentando a concentração de sais na água subterrânea tornando-a salobra ou salina (GHODRATI & GHAZARYAN, 2013).

A salinização também pode ocorrer de forma natural, sendo proveniente da intemperização das rochas e da deposição de sais oriundos dos oceanos pela ação das chuvas e dos ventos. Os sais cíclicos, são sais do oceano transportados para o continente pelo vento na forma de aerossóis e depositados pelas chuvas (RICHARDS, 1954; RIBEIRO et al., 2016; MUNNS, 2016).

Além dos problemas já relatados, um fator agravante que vem sendo relatado é o risco da elevação do nível médio do mar (Mean Sea Level - MSL). Assim, cidades litorâneas situadas em planícies com baixas cotas estão susceptíveis a sofrer maiores danos, como problemas de drenagem urbana e salinização de seus aquíferos, o que

poderá ser intensificado com a elevação do nível do mar de 500 a 844 mm até 2095 (CHEN et al., 2006; MEYSSIGNAC & CAZENAVE, 2012).

Custódio (2010) destaca a importância do conhecimento sobre a utilização dos recursos naturais e do uso dos espaços costeiros para subsidiar e aperfeiçoar instrumentos de controle e de gestão. Uma vez que aproximadamente 70% da população mundial reside nas regiões costeiras e a expansão de áreas agrícolas para suprir a demanda de alimento torna-se necessária.

A utilização de águas com elevadas concentrações de sais na irrigação, pode provocar a salinização e/ou sodificação dos solos trazendo prejuízos à atividade agrícola (MUNNS & TESTER, 2008).

No solo, a predominância de cátions monovalentes, especialmente o sódio, promove um aumento na espessura da dupla camada iônica difusa, aumentando consideravelmente a expansão das partículas de argila, acarretando em dispersão das mesmas (RICHARDS, 1954). Como consequência, há uma redução da taxa de infiltração e da condutividade hidráulica do solo, aumento da densidade e da resistência do solo à penetração de raízes, dificultando o movimento de ar e de água no solo. Além disso, com a expansão da argila, ocorrerá a fragmentação das partículas e, conseqüentemente, modificações na estrutura do solo (VASCONCELOS et al., 2014; SANTOS et al., 2016).

Quando uma partícula coloidal de argila está relativamente seca, os cátions neutralizantes estão fortemente presos à sua superfície (camada de Stern). Quando umedecida, alguns íons dissociam-se e entram em solução formando uma micela, na qual os íons adsorvidos estão espacialmente separados, a uma maior ou menor distância formando uma camada dupla eletrostática ou dupla camada difusa. Nessa camada a concentração iônica decresce à medida que a distância à superfície da partícula aumenta. Juntas, a camada de Stern e difusa formam a camada dupla difusa (FERREIRA et al., 2016).

Nessas condições, os solos se tornam pegajosos quando úmidos e duros quando secos reduzindo a aeração do solo, condição indispensável para o adequado crescimento radicular, já que a presença de oxigênio é essencial ao metabolismo vegetal (SANTOS et al., 2016). Segundo Malavolta et al. (1997) a reduzida aeração dos solos compromete a disponibilidade de nutrientes, causando desbalanço nutricional nas plantas. O oxigênio é o receptor primário de elétrons no solo e, na sua ausência, outros receptores secundários passam a substituí-lo, dentre esses o Mn^{3+} , Mn^{4+} , Fe^{3+} , NO_3^- e SO_4^{2-} . Estes

cátions e radicais aniônicos sofrem redução, convertendo-se em formas indesejáveis à agricultura, ou seja, Mn^{2+} , Fe^{2+} , NO, N_2 , N_2O e H_2S , alguns deles atingindo concentrações tóxicas e outros sendo perdidos no processo de volatilização (SANTOS et al., 2016).

O estresse salino é um dos maiores problemas abióticos que causam diminuição na produção e rendimento de culturas como relatado por diversos autores (PATADE et al., 2011; SHOMEILI et al., 2011; JAMES et al., 2012; PLAZEK et al., 2013; MUNNS & GILLIHAM, 2015; LIRA et al., 2019). Isto, porque, a salinidade de solos causa, direta e indiretamente, efeitos prejudiciais para as plantas pelos desequilíbrios fisiológicos (MUNNS, 2011) e atinge a maioria das culturas por serem sensíveis a altas concentrações de sais no solo (HASANUZZAMAN et al., 2014).

A alta salinidade do solo afeta o crescimento de numerosas espécies de plantas, especialmente glicófitas (sensíveis ao sal em comparação com espécies tolerantes ao sal), nas quais se enquadram as principais culturas. No entanto, essa resposta depende de fatores como: o tempo de exposição ao estresse, composição e concentração dos sais, método e frequência de irrigação, tipo e genótipo da cultura e ambiente no qual se está exposto (MAAS & HOFFMAN, 1977).

A cana-de-açúcar é uma glicófitas classificada como moderadamente sensível à salinidade. O valor limiar da cultura da cana-de-açúcar é de $1,7 \text{ dS m}^{-1}$, limite abaixo do qual a cana consegue ter seu desenvolvimento normal, sem efeitos generalizados (MAAS, 1984). As fases iniciais, tais como germinação e na planta jovem, os sintomas do estresse são mais severos e nestas fases a planta apresenta maior sensibilidade (SENGAR et al., 2013; GUERZONI et al., 2014).

Segundo Blackbum (1984) a cultura não apresenta perda de produção a uma CE de $1,7 \text{ dS m}^{-1}$, porém valores de CE de 3,3; 6,0; 10,4; e 18,6, promovem perdas de rendimento de 10%, 25%, 50% e 100%, respectivamente. Sengar et al. (2013) relatam perdas de até 40% na produtividade de cana-de-açúcar na Índia devido a salinidade de solos. Lira et al. (2018) observaram uma redução de até 28,64% no rendimento de massa verde da cana-de-açúcar (RB867515) irrigada com água salobra ($CEa = 6,5 \text{ dS m}^{-1}$). Os autores ainda destacaram que a variedade foi classificada como moderadamente sensível à salinidade.

A resposta das plantas à salinidade acontece em duas fases distintas. A primeira fase é rápida, pois ocorre imediatamente após o contato com a salinidade, chamada fase osmótica, em que sais como o Ca^{2+} ; K^+ , Na^+ e Cl^- atingem as raízes diminuindo o

potencial osmótico da relação solo-planta, dificultando a absorção de água pela planta. A segunda fase, que ocorre lentamente, é a fase iônica, quando o sal atinge a parte aérea da planta em altas concentrações causando toxicidade e, neste caso, se a velocidade da toxicidade e morte foliar for maior que a produção de novas folhas a fotossíntese é prejudicada e, conseqüentemente, a produção de carboidratos, o que ocasionará a redução do crescimento e produtividade (MUNNS & TESTER, 2008; MUNNS, 2011; MANSOUR, 2014; TAIZ et al., 2017).

Problemas de toxicidade surgem quando os íons na água de irrigação ou no solo se acumulam excessivamente no tecido da planta de tal forma que causam reduções no rendimento, independentemente da concentração total de sais. Este excesso, a princípio, promove um desbalanceamento osmótico celular e, posteriormente, uma toxidez iônica que causa danos ao citoplasma, resultando em danos visíveis (DIAS et al., 2016).

Sob condições não salinas, o citosol de células de plantas superiores contém cerca de 10 mM de sódio (Na^+), um ambiente iônico no qual as enzimas têm funcionamento ótimo. No entanto, em ambientes salinos, os níveis citosólicos de Na^+ superam 100 mM, e esse íon se torna citotóxico. Concentrações elevadas desse íon no citosol, causam desnaturação de proteínas e desestabilização de membranas, pela redução da hidratação dessas macromoléculas (TAIZ et al., 2017). Segundo Dias et al. (2016) os sintomas de toxicidade podem aparecer em qualquer cultura se as concentrações de sais nos tecidos são suficientemente altas ou acima dos seus níveis de tolerância.

Como um íon carregado, Na^+ tem uma permeabilidade muito baixa através da bicamada lipídica, mas pode competir por sítios de transporte de proteínas e atravessar a membrana plasmática por ambos os sistemas de transporte (de afinidade baixa e afinidade alta), muitos dos quais em geral transportam K^+ para dentro das células da raiz (MUNNS & TESTER, 2008; TAIZ et al., 2017).

Alguns sintomas comuns de toxicidade de sódio aparecem em forma de queimaduras ou necrose, ao longo das bordas. As concentrações de sódio nas folhas alcançam níveis tóxicos após vários dias ou semanas e os sintomas aparecem, de início, nas folhas mais velhas e em suas bordas e, à medida que o problema se intensifica, a necrose se espalha progressivamente na área internerval, até o centro das folhas (DIAS et al, 2016). Ainda de acordo com os autores, análises do teor de sódio na água ou percentagem de sódio trocável (PST) no solo permitem um diagnóstico preciso dos sintomas de toxicidade.

4.5. Efeitos da salinidade na nutrição mineral das plantas

O acúmulo de sais no solo reduz o potencial osmótico da solução e a disponibilidade de água, e, nessas condições a capacidade produtiva da cultura torna-se comprometida, bem como a habilidade da planta em absorver de forma eficiente água e nutrientes disponíveis do solo (OLIVEIRA et al., 2011; MANSOUR, 2014; TAIZ et al., 2017).

O uso de águas salobras ou o manejo inadequado da irrigação em cultivos tem impactos diretos no equilíbrio iônico do solo e em sua estrutura. A entrada contínua de quantidades de sais no solo pela água altera as concentrações iônicas e as relações entre íons induzindo relações antagônicas entre nutrientes na planta, além de alterar a estrutura dos agregados e a condutividade hidráulica, gerando problemas de salinidade/sodicidade nos solos o que pode causar redução no desenvolvimento das plantas (DIAS et al., 2016). O aumento da concentração de NaCl na água de irrigação, ao elevar os teores Cl^- no caule e de Na^+ nas diferentes partes da planta, inibe a absorção de nutrientes, ocasionando redução nos teores de N, K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} nas raízes das plantas (COSTA et al., 2008).

Conceitualmente, por apresentarem elevada saturação por bases, a princípio, poderia se afirmar que os solos afetados por sais possuem elevada fertilidade. No entanto, deve-se observar que a elevada percentagem de sódio afeta negativamente a fertilidade do solo. A salinidade e a sodicidade adicionam um novo nível de complexidade para a nutrição mineral das culturas, afetando a atividade dos íons em solução e os processos de absorção, transporte, assimilação e distribuição. Essa complexidade é explicada pelas diferenças na concentração e na composição iônica dos meios salinos aos quais as plantas são submetidas, pelos nutrientes essenciais envolvidos e pelas diferentes respostas das plantas tanto em relação à salinidade como para à eficiência na aquisição de nutrientes do solo (SANTOS et al., 2016).

De acordo com Richards (1954), solos afetados por sais têm sua classificação baseada na concentração de sais solúveis do extrato da solução do solo, na percentagem de sódio trocável (PST) e no potencial hidrogeniônico (pH):

Solos salinos: são aqueles em que o crescimento das plantas é inibido pela elevada concentração de sais solúveis. Podem ser convertidos em solos não salinos pela lixiviação do excesso de sais da zona radicular. A condutividade elétrica do extrato de

saturação do solo (CEes) é superior a 4 dS m⁻¹; percentual de sódio trocável inferior a 15%; pH geralmente é inferior a 8,5. Normalmente são solos bem flocludados.

Solos salino-sódicos: apresentam CEes maior que 4 dS m⁻¹ e PST superior a 15%, pH situa-se em torno de 8,5. A sua limitação à produtividade vegetal deve-se ao efeito conjunto da concentração excessiva de sais solúveis e de sódio trocável. Nestes solos ocorre a lixiviação mais intensa dos sais solúveis que do sódio trocável, convertendo-o em solo sódico.

Solos sódicos: têm CEes inferior a 4 dS m⁻¹, PST maior que 15% e pH superior a 8,5. Deve-se destacar que o pH do solo não é fator decisivo na classificação, pois há solos sódicos ou salino-sódicos com reação ácida, com pH variando de 5,0 a 6,0. A alcalinidade dos solos afetados por sais é mais frequente nos solos salino-sódico e sódicos, e esta se deve à baixa concentração hidrogeniônica (H⁺) e à elevada concentração dos ânions OH⁻, CO₃²⁻ e HCO₃⁻.

Devido à alta absorção de Na⁺ e baixa de Ca²⁺ pelas plantas, em solos sódicos, a permeabilidade da membrana é afetada, reduzindo o transporte de íons. A baixa concentração de Ca²⁺ nesses solos também conduz a um aumento na absorção de Zn, Ni, Mg, Pb, Se, Al e B, em níveis que podem desenvolver a toxicidade. Os altos níveis de Na⁺ induz a deficiências de Ca²⁺ e/ou Mg²⁺ para as plantas (SANTOS et al., 2016).

Segundo Malavolta (1997) o Ca²⁺ em baixas concentrações favorece a absorção do K⁺, há um sinergismo entre esses elementos, porém, altas concentrações de Ca²⁺ inibe a absorção do K⁺. O aumento nas concentrações de K⁺ e Ca²⁺ na solução do solo frequentemente induzirá à deficiência de Mg²⁺ nas plantas. No entanto, os teores elevados de Mg²⁺ não causam o mesmo efeito sobre o K⁺, isso ocorre porque o K⁺ pode atravessar a membrana plasmática com maior velocidade, diminuindo a absorção de cátions mais lentos como Ca²⁺ e Mg²⁺. Entre Ca²⁺ e Mg²⁺ há um efeito antagônico, ou seja, o excesso de um prejudica a absorção do outro. O excesso de potássio pode causar também a inibição na absorção de B, Zn²⁺, Mn²⁺ e NH₄⁺.

Entre P e Mg²⁺ ocorre um sinergismo, ou seja, a absorção de P é máxima quando na presença de Mg na solução do solo, por este se tratar de um carregador de P. a presença de Ca²⁺, Fe²⁺, Cu²⁺ e Mg²⁺ em solução tem efeito inibidor na absorção de Zn²⁺. Já o Cu²⁺ diminui a absorção de Zn²⁺ possivelmente porque Cu²⁺ e Zn²⁺ devido a competição pelo mesmo carregador ou canal protético (MALAVOLTA et al., 1997).

Em função da baixa fertilidade dos solos sódicos a salino-sódicos, a cultura tem o suprimento de N deficiente e este deve ser suplementado através de fertilizantes. O

aumento do pH provoca maior volatilização da NH_3 da ureia ou de outras fontes (FENN & KISSEL, 1973). Ainda de acordo com os autores, quanto maior for a extração de N pelas plantas será necessária uma maior quantidade de P necessária para a síntese de N, assim, quando há um suprimento inadequado de P, observa-se redução na absorção do nitrato.

Lira et al. (2019) avaliaram o acúmulo de nutrientes na cana-de-açúcar (RB867515) submetida a níveis de salinidade da água de irrigação (0,5; 2,0; 3,5; 5,0 e 6,5 dS m^{-1}) e as condições sem (FL = 0) e com fração de lixiviação (FL = 0,17) em Recife - PE, encontrando os seguintes valores médios de nutrientes: 1,06 kg de N, 0,12 kg de P, 1,68 kg de K, 1,47 kg de Ca, 0,58 kg de Mg, 0,23 kg de S por tonelada (K > Ca > N > Mg > S > P).

4.6. Efeitos da salinidade na qualidade industrial das plantas

A maturação da cana-de-açúcar pode ser considerada sob dois diferentes pontos de vista conforme Viana et al. (2015): botânico e fisiológico. Botanicamente, a maturação ocorre após a emissão de flores e formação de sementes que possam dar origem a novas plantas. Levando em conta a reprodução vegetativa, a que se usa na prática, a maturação ocorre quando as gemas já estão em condições de darem origem à novas plantas, sendo considerada muito mais cedo no ciclo. Fisiologicamente, a maturação é alcançada quando os colmos atingem o seu potencial de armazenamento de sacarose, ou seja, o máximo acúmulo de açúcar possível.

Esse processo envolve um sistema metabólico que se inicia com a atividade fotossintética nos cloroplastos das células foliares, responsáveis pela interceptação e conversão da energia solar (SINGELS et al., 2005; LEITE et al, 2010; PINHEIRO & CHAVES, 2011). Os produtos finais da fotossíntese são açúcares com cinco e seis átomos de carbono: a glicose fosforilada é convertida em frutose-monofosfato e depois em frutose-difosfato que se combina com a glicose livre, formando sacarose fosfato. Essa sacarose sofre fosforilação através da tiamina ou riboflavina, formando-se a sacarose livre (TAIZ et al., 2017).

Segundo Camargo (1976) a sacarose e açúcares redutores (glicose e frutose) que são sintetizados nas folhas, se translocam dia e noite a todas as partes da planta através do floema. Já os polissacarídeos como o amido, se acumulam temporariamente durante a noite, na bainha. Os principais locais de acúmulo de sacarose durante a maturação são as células do parênquima e o espaço intercelular dos colmos (MCCORMICK et al.,

2006). Ainda de acordo com os autores, esses poderosos drenos são regulados pelo metabolismo de produção e alocação de açúcares e de alta prioridade na alocação de foto-assimilados produzidos nas fontes, as folhas.

O colmo constitui-se num reservatório onde, em condições favoráveis à maturação, é acumulada grande quantidade de sacarose. É formado por uma sucessão de internódios em diferentes estádios fisiológicos: internódios maduros (base), em maturação (meio) e imaturos (ponta), de modo que a medida em que a maturação progride, o teor de sacarose tende a se igualar (FERNANDES & BENDA, 1985; MACHADO, 1987).

Os internódios imaturos, localizados na região do colmo com folhas verdes, são fibrosos, com alta concentração de hexoses e baixa concentração de sacarose. À medida que estes internódios se desenvolvem sua taxa de crescimento diminui progressivamente, até ser nula, quando o internódio amadurece (VIANA et al., 2015). A taxa de acúmulo de sacarose é maior durante a última fase do ciclo da cultura, coincidindo com períodos de restrição climática (temperaturas amenas e baixa disponibilidade hídrica) que induzem à maturação (ALMEIDA et al., 2008; DARLI et al., 2008; ABREU et al., 2013).

As enzimas citosólicas sacarose fosfato sintase e sacarose sintase catalisam a síntese de sacarose e exercem influência na distribuição de açúcares a outras partes da cana-de-açúcar (HUBER & HUBER, 1996; BATTA et al., 2011). Por outro lado, enzimas que catalisam a quebra e remobilização de sacarose, como as invertases ácidas e neutras podem comprometer o acúmulo de sacarose nos vacúolos das células parenquimáticas do colmo, principalmente sob condições de estresse ambiental (JAIN et al., 2013).

Nos tecidos imaturos, onde predomina a rápida expansão celular, a sacarose acumulada é rapidamente hidrolisada pelas invertases ácidas e neutras, movendo rapidamente as hexoses resultantes para o citoplasma, onde são utilizadas no crescimento e desenvolvimento celular. Nas plantas em fase de maturação essas enzimas baixam a atividade indicando que está ocorrendo acúmulo efetivo de sacarose (JAIN et al., 2013).

O caldo da cana-de-açúcar apresenta em sua constituição de 78% a 86% de água, 10% a 20% de sacarose, 0,1% a 2,0% de açúcares redutores, 0,3% a 0,5% de cinza e 0,5% a 1,0% de compostos nitrogenados (OLIVEIRA et al., 2016).

O CONSECANA (2015) informa que os principais indicadores de avaliação da qualidade da cana são: °Brix (porcentagem de sólidos solúveis), Pol (porcentagem aparente de sacarose), pureza aparente (PZA), AR (porcentagem de açúcares redutores) e porcentagem de fibra (F), de modo que a partir dessas variáveis, pode-se calcular a quantidade de ATR (açúcar total recuperável), utilizada para definir o valor a ser pago pela matéria-prima.

A determinação do °Brix é de suma importância para o cálculo da pureza da matéria-prima e demais produtos da fabricação, além de indicar balanços de massa e divisão de cana para a produção de açúcar e etanol (OLIVEIRA et al., 2016). O CONSECANA (2015) destaca que para a indústria canavieira, quanto mais elevados os teores de sacarose (Pol), melhor é a qualidade do caldo, de forma que valores reduzidos indicam a conversão dos açúcares redutores totais em etanol pelas leveduras, levando a perdas econômicas no processo industrial.

A porcentagem da fibra da cana afeta a eficiência da extração da moenda, ou seja, quanto mais alta a fibra da cana, menor será a eficiência de extração. No entanto, variedades de cana com baixos teores de fibra são mais suscetíveis a danos mecânicos e acamamento (MARQUES et al., 2008). Ainda de acordo com os autores o aumento do teor de fibra possui relação negativa com o teor de açúcar. De acordo com Correia et al. (2013) a cada acréscimo de 1% de fibra pode reduzir em torno de 1,85 kg de açúcar por tonelada.

Os açúcares redutores (AR) se referem à quantidade de glicose e de frutose presentes na cana e estão diretamente relacionados a sua pureza, já que refletem em menor eficiência na recuperação da sacarose pela fábrica (CONSECANA, 2015).

Segundo Assis et al. (2004) o caldo extraído da cana-de-açúcar tem, aproximadamente 15 °Brix e pureza varia entre 80% e 87%. CONSECANA (2015) estabelece valores de qualidade do caldo considerados adequados, sendo o °Brix superior a 18%, Pol superior a 14%, pureza maior que 75% e AR menor que 0,8%.

A ocorrência de fatores limitantes para o desenvolvimento da cana-de-açúcar pode resultar em prejuízos para a qualidade da matéria prima, com reflexos diretos e indiretos sobre o processamento industrial dos colmos.

A cana-de-açúcar é cultivada principalmente em regiões áridas e semiáridas, nas quais a variação climática anual marcada por déficits hídricos frequentes, tem sido uma das principais causas de redução da produtividade agrícola (ABREU et al., 2013). Na

região Nordeste do Brasil, com predominância de clima semiárido as grandes áreas de cultivo se concentram, principalmente nos tabuleiros costeiros.

Em áreas litorâneas é comum a presença de águas salobras devido à intrusão salina, deposição pela ação das chuvas e dos ventos na forma de aerossóis, aliado ao excesso de exploração que intensifica processos de salinização e/ou sodificação dos solos trazendo prejuízos à agricultura (GHODRATI & GHAZARYAN, 2013). Além disso, devido a distribuição irregular das chuvas, é comum a utilização da irrigação complementar o que proporciona melhorias na qualidade tecnológica, eficiência de uso da água, balanço líquido de carbono e, conseqüentemente na produtividade (MARIN & NASSIF, 2013; DHANAPAL et al., 2019). A água utilizada na irrigação nessa região, principalmente nos tabuleiros costeiros apresenta em grande parte alto teor de sais, tanto nos açudes de pequeno e médio porte (superficiais) e poços (subterrâneas) (MEDEIROS et al., 2016).

As relações entre alterações ambientais promovidas pelo estresse salino e as mudanças fisiológicas relacionadas ao processo de maturação da cana-de-açúcar tem sido temas de importantes pesquisas. O aumento no teor de sais no solo associados a ausência de condições químicas e físicas que permitam a sua lixiviação, reduz de forma significativa o rendimento da cana-de-açúcar e afeta a qualidade do caldo reduzindo parâmetros como °Brix, Pol e Pureza, bem como aumento no teor de açúcares redutores (AR) e Fibra (THOMAS et al., 1981; LINGLE & WIEGAND, 1997; WIEDENFELD, 2008; ASHRAF et al., 2009; GOLABI et al., 2009; WATANABE et al., 2016).

4.7. Uso da fração de lixiviação para manejo dos sais na agricultura

Nos casos em que os níveis salinos são prejudiciais às plantas, geralmente, a lixiviação é a chave para a irrigação bem sucedida. No entanto, o êxito dessa operação depende essencialmente da existência de um sistema de drenagem eficiente (PUGA et al., 2016; ZHANG et al., 2019). De acordo com Bernardo et al. (2019), a drenagem é necessária, mesmo nas regiões onde a ocorrência de chuvas significativas dispensa a aplicação de uma lâmina de irrigação, para lixiviação de sais.

A lixiviação dos sais no perfil, controla a acumulação na zona radicular das culturas. Essa lixiviação pode ser proporcionada pela precipitação pluvial ou pela aplicação de uma lâmina de água de irrigação superior àquela requerida pela cultura (MEDEIROS et al., 2016).

A quantidade de água que deve ser lixiviada abaixo da zona radicular, depende da concentração de sais na água de irrigação, no solo e lençol freático, da tolerância das culturas a serem exploradas, das condições climáticas, e do manejo do solo e da água (HOFFMAN, 1981). A necessidade de lixiviação é a fração mínima da quantidade total de água aplicada que atravessa e percola a zona radicular, para prevenir a redução no rendimento da cultura (DUARTE et al., 2015; PUGA et al., 2016; ZHANG et al., 2019).

A razão entre a lâmina total de irrigação e lâmina de lixiviação é denominada de fração de lixiviação, ou seja, entre lâmina necessária para satisfazer a demanda hídrica da cultura e a lâmina que percola abaixo da zona radicular, sendo calculada em função da condutividade elétrica da água de irrigação e da condutividade elétrica da água drenada (KELLEY, 1963; AYERS & WESTCOT, 1999). De acordo com Richards (1954) os sais se movem com a água, assim, a salinidade depende diretamente do manejo da água.

Segundo Duarte et al. (2015) a lixiviação dos sais solúveis em excesso nos solos irrigados torna-se imprescindível, sem o que haverá sua acumulação, que é diretamente proporcional ao teor de sais da água de irrigação e a lâmina de água aplicada. A salinidade da água de irrigação e a tolerância da cultura aos sais é algo muito importante, pois quanto mais salina é a água de irrigação ou mais sensível é a cultura à salinidade, mais lixiviação deve existir para manter o rendimento da cultura elevado (MEDEIROS et al., 2016).

A frequência da lixiviação deve permitir a manutenção da salinidade abaixo da concentração que ocasionaria reduções inaceitáveis nos rendimentos. Isso implica que a lixiviação pode ser praticada a cada irrigação, com irrigações intercaladas, ou ainda, com menos frequência, como em cada período (estação) ou intervalos ainda maiores (AYERS & WESTCOT, 1999). Segundo Hoffman et al. (1992), quando a salinidade de água de irrigação não é muito elevada, de modo que, durante o ciclo da cultura não ultrapasse a salinidade limiar, não são necessárias lixiviações constantes podendo-se realizar apenas uma lavagem de recuperação ao final do ciclo da cultura.

O clima é um dos principais fatores que devem ser levados em consideração na frequência de lixiviação. Em regiões chuvosas, nos meses frios, deve-se intensificar a lixiviação neste período, para isso deve-se irrigar a área até a capacidade de campo, antes do início das chuvas e quando estas chegarem proporcionarão a lixiviação total ou parcial dos sais. Além disso, sempre que possível, deve-se programar a lixiviação durante os períodos de menor consumo de água pelas culturas (AYERS & WESTCOT, 1999).

Em solos com condições deficientes de drenagem, irrigações mais frequentes podem ser prejudiciais. Efeitos prejudiciais dessa alta frequência de irrigação foram relatados por Bernstein & François (1973), onde os mesmos atribuíram à redução de rendimento provocada a maior frequência de irrigação que promoveu maior acúmulo de sais próximos à superfície do solo uma vez que as pequenas lâminas de excesso aplicadas de cada vez associadas a um ineficiente sistema de drenagem não foram suficientes para deslocar os sais até as camadas mais profundas. Nessas condições, áreas que tenham um lençol freático elevado provocará uma ascensão capilar da água subterrânea, aumentando a salinidade do solo (KOVDA et al., 1973).

Ainda de acordo com os autores, o aumento da frequência de irrigação, resultou em uma mudança para cima do pico de salinidade no perfil de distribuição de sais, fazendo com que aumentasse a concentração média de sais na porção superior da zona radicular. Além disso, houve um acréscimo na evaporação na superfície do solo, levando a aplicações adicionais de água e um acréscimo na quantidade de sais aplicados. Medeiros et al. (2016) afirmam que nesses casos para resolver este problema seria necessário aplicar lâminas de lixiviação maiores a intervalos maiores para que esta lâmina de excesso percole até as camadas mais profundas fora da zona radicular.

Em condições propícias que favoreçam a lixiviação, Hoffman et al. (1992) afirmam que apesar de poucas evidências experimentais existentes, sustenta-se como recomendação comum, que o intervalo de irrigação seja diminuído quando se utiliza água salina. Ainda de acordo com os autores, para o cultivo em solos salinos a frequência de irrigação é um fator muito importante, pois, quanto maior a frequência, menor será a concentração dos sais, devido ao efeito da diluição.

Irrigações frequentes também mantêm o movimento dos sais para fora da zona radicular. Geralmente, quando as irrigações são feitas frequentemente, a lâmina de irrigação aplicada é sempre pequena, porém, deve sempre permitir um excesso que percole até as camadas mais profundas fora da zona radicular (PIZARRO, 1990; YURTSEVEN et al., 2014; DEVKOTA et al., 2015).

Tanto o método como a frequência de irrigação interferem na adequação da água e tolerância das plantas à salinidade. Em métodos de irrigação por superfície (como inundação ou sulcos) e localizada (gotejamento), a concentração de sais suportada pelas culturas é bem mais elevada do que no método de irrigação por aspersão (KOVDA et al., 1973). A não observância de determinados princípios básicos, como a escolha do método de irrigação apropriado para a aplicação de água de qualidade conveniente,

conduz, quase sempre, a deterioração das propriedades físicas e químicas do solo, limitando com isso o potencial produtivo das culturas (AMORIM, 1994).

Uma irrigação de alta frequência com águas com altos teores de sais utilizando sistemas de irrigação localizada, como por exemplo o gotejamento, produz concentrações elevadas de sais na superfície do solo e no contorno do bulbo, desse modo, chuvas de pouca intensidade podem mover os sais para dentro da zona radicular. Neste caso, segundo Pizarro (1990) as irrigações devem ser manejadas durante ou após as chuvas para lixiviar os sais antes que crie situações de danos às culturas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, M. L. DE; SILVA, M. A.; TEODORO, I.; HOLANDA, L. A. DE; SAMPAIO NETO, G. D. Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Bragantia**, v.72, n.3, p.262-270, 2013.

ALADOS, C. L.; PUIGDEFABREGAS, J.; MARTINEZFERNANDEZ, J. Ecological and socio-economical thresholds of land and plant-community degradation in semi-arid Mediterranean areas of southeastern Spain. **Journal of Arid Environments**, v.75, n.12, p.1368-1376, 2011.

ALMEIDA, A. C. S.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G. V. S. B.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIOR, R. A. F. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação a disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, n.5, p.1441-1448, 2008.

ALMEIDA, O. A. **Qualidade da água de irrigação**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2010. 234p.

AMARAL, J. F. T.; MARTINEZ, H. E. P.; LAVIOLA, B. G.; FERNANDES FILHO, E. I.; CRUZ, C. D. Eficiência de utilização de nutrientes por cultivares de cafeeiro. **Ciência Rural**, v.41, n.4, p.621-629, 2011.

AMORIM, J. R. A. **Comportamento do alho (*Allium sativum* L.) sob duas formas de aplicação e diferentes níveis de salinidade na água de irrigação**. 114f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola), Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba - Campus II Campina Grande - Brasil, 1994.

ANA - Agência Nacional de Águas (Brasil). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Brasília: ANA, 2017. 86p.

ARALDI, R.; SILVA, F. M. L.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D. Florescimento em cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v.40, n.3, 2010.

ARAÚJO, S. M. S. A região semiárida do nordeste do Brasil: questões ambientais e possibilidades de uso sustentável dos recursos. **Revista Rios Eletrônica**, v.5 n.5, p.89-98, 2011.

ASHRAF, M.; RAHMATULLAH, AHMAD, R.; AFZAL, M.; TAHIR, M. A.; KANWAL, S.; MAQSOOD, M. A. Potassium and Silicon Improve yield and juice quality in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) under salt stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.195, p.284-291, 2009.

ASSIS, P. C. O.; LACERDA, R. D.; AZEVEDO, H. M.; DANTAS NETO, J.; FARIAS, C. H. A. Resposta dos parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar a diferentes lâminas de irrigação e adubação. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.4, n.2, p.337-342, 2004.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. 2.ed. Campina Grande: UFPB, 1999. 153p. FAO. Estudos de Irrigação e Drenagem, 29 revisado 1.

BATTA, S. K.; DEEKSHA, T. K. S.; SINGH, P.; UPPAL, S. K. Variability in activities of sucrose metabolizing enzymes in relation to sucrose accumulation among parents and their progenies of sugarcane. **Sugar Tech**, v.13, p.114-122, 2011.

BENETT, C. G. S.; BUZETTI, S.; BENETT, K. S. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; COSTA, N. R.; MAEDA, A. S.; ANDREOTTI, M. Acúmulo de nutrientes no colmo de cana-de-açúcar em função de fontes e doses de manganês. **Semina: Ciências Agrárias**, v.34, p.1077-1088, 2013.

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

BERNSTEIN, L.; FRANÇOIS, L. E. Leaching requirement studies: sensitivity of alfalfa to salinity of irrigation and drainage waters. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.37, p.931-943, 1973.

BEZUIDENHOUT, C. N.; OLEARY, G. J.; SINGELS, A.; BAJIC, V. B. A process-based model to simulate changes in tiller density and light interception of sugarcane. **Crops and Agricultural Systems**, v.76, n.2, p.589-599, 2003.

BLACKBURN, F. **Sugar-Cane**. Longman, New York, NY, USA, 1984. 414p.

BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; FIGUEIREDO, E. B.; OLIVEIRA, B. G.; LA SCALA Jr., N. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v.38, n.13, 2018.

BRAGA JUNIOR, R. L. C.; LANDELL, M. G. A.; SILVA, D. N. da; BIDOIA, M. A. P.; SILVA, T. N. S.; TOMAZINHO JÚNIOR, J. R.; SILVA, V. UH. P. da. **Censo varietal IAC no Brasil: safra 2016/17 e na região Centro-Sul - safra 2017/18.** (Série Tecnologia APTA. Boletim Técnico IAC). 2018. 17p.

CAIEIRO, J. T.; PANOBIANCO, M.; BESPALHOK FILHO, J. C.; OHLSON, O. C. Physical purity and germination of sugarcane seeds (Caryopses) (*Saccharum* spp.). **Revista Brasileira de Sementes**, v.32, n.2, p.140-145, 2010.

CÂMARA, G. M. S. Ecofisiologia da cultura da cana-de-açúcar. **In:** CÂMARA, G. M. S., OLIVEIRA, E. A. M. (Eds.). Produção da cana-de-açúcar. Piracicaba: FEALQ, 1993, p.31-64.

CAMARGO, P. N. **Fisiologia de la caña de azúcar.** México: Comisión Nacional de la Industria Azucareira/Instituto para el Mejoramiento de la Producción de Azúcar, 1976. 59p.

CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F.; MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de Fertilizantes. **In:** NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (eds.) Fertilidade do Solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p769-872.

CASTRO, P. R. C.; CHRISTOFFOLETI, P. J. Fisiologia da cana-de-açúcar. **In:** MENDONÇA, A. F. Cigarrinhas da cana-de-açúcar: Controle biológico. 1.ed. Maceió: Insecta, 2005. p.3-48.

CAVALCANTI, F. J. A.; SANTOS, J. C. P.; PEREIRA, J. R.; LEITE, J. P.; SILVA, M. C. L.; FREIRE, F. J.; SILVA, D. J.; SOUSA, A. R.; MESSIAS, A. S.; FARIA, C. M. B.; BURGOS, N.; LIMA JÚNIOR, M. A.; GOMES, R. V.; CAVALCANTI, A. C.; LIMA, J. F. W. F. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco.** 2.ed. Recife: Instituto Agrônomo de Pernambuco, 2008. 198p.

CESNIK, R.; MIOCQUE, J. **Melhoramento da cana-de-açúcar**. Brasília: Embrapa, 2004. 307p.

CHEN, J. L.; WILSON, C. R.; TAPLEY, B. D.; HU, X. G. Thermosteric Effects on Interannual and Long-term Global Mean Sea Level Changes. **Journal of Geodesy**, v.80, n.5, p.240-247, 2006.

COELHO, F. S.; VERLENGIA, F. **Fertilidade do solo**. 2.ed. Campinas, Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1973. 384p.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar**. v.6 - safra 2019/2020 - Terceiro levantamento. Brasília, 2019. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana> >. Acesso em: 26 ago. 2019.

CONSECANA - Conselho dos produtores de cana-de-açúcar, açúcar e álcool do Estado de São Paulo. **Manual de Instruções**. 6.ed. Piracicaba - SP, 2015. 80p.

CORREIA, C. B. G.; AZEVEDO, H. M. DE; DANTAS NETO, J.; CARVALHO, C. M.; SILVA, L. L.; FEITOSA, S. O. Cana-de-açúcar: parâmetros tecnológicos em função de diferentes lâminas de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.8, n.1, p.26-37, 2013

COSTA SOBRINHO, A. F. **Análise de cenários da salinização dos aquíferos costeiros da planície do Recife levando em conta os efeitos da elevação do nível do mar**. 229f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

COSTA, D. M. A.; MELO, H. N. S.; FERREIRA, S. R.; DANTAS, J. A. Conteúdo de N, P, K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ no amaranto (*Amaranthus* spp.) sob estresse salino e cobertura morta. **Revista Ciência Agronômica**, v.39, n.2, p.209-216, 2008.

CUSTÓDIO, E. Coastal aquifers of Europe: an overview. **Hydrogeology Journal**, v.18, n.4, p.269-280, 2010.

DALRI, A. B.; CRUZ, R. L.; GARCIA, C. J. B.; DUENHAS, L. H. Irrigação por gotejamento subsuperficial na produção e qualidade de cana-de-açúcar. **Irriga**, v.13, n.1, p.1-11, 2008.

DEVKOTA, M., GUPTA, R. K., MARTIUS, C., LAMERS, J. P. A., DEVKOTA, K.P., SAYRE, K. D., VLEK, P. L. G. Soil salinity management on raised beds with different furrow irrigation modes in salt-affected lands. **Agricultural Water Management**, v.152, n.5, p.243-250, 2015.

DHANAPAL, R.; TAYADE, A. S; BHASKARAN, A. Efficient water management in sugarcane with composted coir pith and sugarcane trash under tropical Indian conditions. **Sugar Tech**, v.21, n.5, p.256-264, 2019.

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

DOOREMBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193p. Irrigation and Drainage Paper 33.

DUARTE, S. N.; SILVA, E. F. F.; MIRANDA, J. H.; MEDEIROS, J. F.; COSTA, R. N. T. **Fundamentos de drenagem agrícola**. 1.ed. Fortaleza, CE: INCTsal, 2015. 356p.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2018**: Ano base 2017. EPE, Ministerio de Minas e Energia, Rio de Janeiro, 2018.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. **Nutrição Mineral de Plantas**: Princípios e Perspectivas. 2.ed. Editora Planta: Londrina. 2006. 404p.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW)**. Managing systems at risk., Rome and Earthscan, 2011. 308p.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. World Food and Agriculture - Statistical pocketbook 2019. Rome. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/ca6463en/ca6463en.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2019.

FAQUIN, V. **Diagnose do estado nutricional das plantas**. 2002. 77f. Dissertação (Especialização Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas no Agronegócio) - Universidade Federal de Lavras: Lavras, MG, 2002.

FENN, L. B.; KISSEL, D. E. Ammonia volatilization from surface applications of ammonium compounds on calcareous soils. I. General theory. **Soil Science Society of America**, v. 37, n.1, p. 855-859, 1973.

FERNANDES, A. C.; BENDA, G. T. A. Distribution patterns of Brix and fiber in the primary stalk of sugar cane. **Sugar Cane**, v.5, p.8-13, 1985.

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

FIGUEIREDO, P. Breve história da cana-de-açúcar e o papel do Instituto Agrônomo no seu estabelecimento no Brasil. **In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; LANDELL, M. G. de A. (Ed.). Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. p.31-44.**

GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. Sugarcane. **In: TEARE, I.D.; PEET, M.M. (Ed.). Crop-water relations. New York: Wiley-Interscience, 1983. p.445-479.**

GAVA, G. J. C.; SILVA, M. A.; SILVA, R. C.; JERONIMO, E. M.; CRUZ, J. C. S.; KOLLN, O. T. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.3, p.250-255, 2011.

GENHUA, N.; RAUL, C. Growth and Physiological Responses of Landscape Plants to Saline Water Irrigation: A Review. **Hortscience**, v.45, n.11, p.1065-1609, 2010.

GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados. Fortaleza: INCTSal, 2016, 504p.**

GHODRATI, M.; GHAZARYAN, S. Agriculture water supply in semi-arid zone by underground dams. **European Journal of Experimental Biology**, v.33, n.3, p.706-711, 2013.

GHODRATI, M.; GHAZARYAN, S. Agriculture water supply in semi-arid zone by underground dams. **European Journal of Experimental Biology**, v.33, n.4, p.706-711, 2013.

GOLABI, M.; NASERI, A. A.; KASHKULI, H. A. Mathematical modeling of the relationship between irrigation water salinity and sugarcane juice quality. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v.7, n.3 e 4, p.600-602, 2009.

GUERZONI, J. T. S.; BELINTANI, N. G.; MOREIRA, R. M. P.; HOSHINO, A. A.; DOMINGUES, D. S.; BESPALHOK FILHO, J. C.; VIEIRA, L. G. E. Stress-induced D1-pyrroline-5-carboxylate synthetase (P5CS) gene confers tolerance to salt stress in transgenic sugarcane. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.36, n.6, p.309-319, 2014.

GUIMARÃES, M. J. M.; SIMÕES, W. L.; TABOSA, J. N.; SANTOS, J. E.; WILLADINO, L. Cultivation of forage sorghum varieties irrigated with saline effluent from fish-farming under semiarid conditions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.20, n.5, p.461-465, 2016.

GUPTA, V.; RAGHUVANSHI, S.; GUPTA, A.; SAINI, N.; GAUR, A.; KHAN, M. N.; GUPTA, R. S.; SINGH, J.; DUTTAMAJUMDER, S. K.; SUMAN, A.; KHURANA, J. P.; KAPUR, R.; TYAGI, A. K. The water-deficit stress- and red-rot-related genes in sugarcane. **Functional Integrative Genomics**, v.10, n.2, p.207-214, 2010.

HANIN, M.; EBEL, C.; NGOM, M.; LAPLAZE, L.; MASMOUDI, K. New insights on plant salt tolerance mechanisms and their potential use for breeding. **Frontiers in Plant Science**, v.7, n.1787, p.1-17, 2016.

HASANUZZAMAN, M.; ALAM, M.M.; RAHMAN A.; HASANUZZAMAN M.; NAHAR K.; FUJITA M. Exogenous proline and glycine betaine mediated upregulation of antioxidant defense and glyoxalase systems provides better protection against saltinduced oxidative stress in two rice (*Oryza sativa* L.) varieties. **BioMed Research Internatinal**, v.1, n.1, p.1-17, 2014.

HEERDEN, P. D. R. V.; DONALDSON, R. A.; WATT, D. A.; SINGELS, A. Biomass accumulation in sugarcane: unravelling the factors underpinning reduced growth phenomena. **Journal of Experimental Botany**, v.61, n.11, p.2877-2887, 2010.

HITCHCOCK, A.S. Type species of the first 100 genera of Linnaeus' Species plantarum. **American Journal of Botany**, v.10, n.9, p.510-514, 1923.

HOFFMAN, G. J. Alleviating salinity stress. **In:** ARKIN, G. F.; TAYLOR, H. M. (Ed.). *Modifying the Root Environment to Reduce Crop Stress*. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers. 1981. Cap.9, p.305-343.

HOFFMAN, G. J.; HOWELL, T. A.; SOLOMON, K. H. **Management of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASAE, Pamela De-Vore-Hansen, 1992. cap.18, p.667-715. ASAEMONOGRAPH, 9.

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

HUBER, S. C.; HUBER, J. L. Role and regulation of sucrose phosphate synthase in higher plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v.47, p.431-444, 1996.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produto Interno Bruto 2018**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php>>. Acesso em: 22 dez. 2018.

INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v.89, n.2, p.107-122, 2004.

INMAN-BAMBER, N. G.; BONNETT, G. D.; SPILLMAN, M. F.; HEWITT, M. L.; JINGSHENG X. Source-sink differences in genotypes and water regimes influencing sucrose accumulation in sugarcane stalks. **Crop & Pasture Science**, v.60, n.4, p.316-327, 2009.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v.92, n.1, p.185-202, 2005.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Normal Climatológica do Brasil: 1981-2010**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologica>>. Acesso em: 04 jun. 2019.

IRVINE, J. E. Sugarcane physiological characteristics, yield potential and climatic and environment factors. **In:** SMITH, W. H. BANTA, S. J. eds. Symposium on Potential Productivity of Field Crops Under Different Environments., p.361-281. 1983.

JADOSKI, C. J. TOPPA, E. V. B.; JULIANETTI, A.; HULSHOF, T.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D. Fisiologia do desenvolvimento do estágio vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v.3, n.2, 2010.

JAIN, R.; CHANDRA, A.; SOLOMON, S. Impact of exogenously applied enzymes effectors on sucrose metabolizing enzymes (SPS, SS and SAI) and sucrose content in sugarcane. **Sugar Tech**, v.15, n.2, p.370-378, 2013.

JAMES, R.A.; BLAKE, C.; ZWART, A.B.; HARE, C.R.A.; RATHJEN, A.J.; MUNNS, R. Impact of ancestral wheat sodium exclusion genes *Nax1* and *Nax2* on grain yield of durum wheat on saline soils. **Functional Plant Biology**, v.39, p.609-618, 2012.

KALAVROUZIOS, I. K.; KOUKOULAKIS, P. H.; MEHRA, A. Quantification of elemental interaction effects on Brussels sprouts under treated municipal wastewater. **Desalination**, v.254, n1., p.6-11, 2010.

KELLEY, W. P. Use of saline irrigation water. **Soil Science**, v.95, n.4, p.385-391, 1963.

KOVDA, V. A.; YARON, B.; SHALHEVET, Y. Quality of irrigation water. **In:** KOVDA, V. A.; BERG, C. VAN DEN; HAGAN, R. M. (Ed.) International source book on irrigation, drainage and salinity. London: Hutchinson/FAO/UNESCO, 1973. Cap.7, p.177-205.

LEE, T. S. G. Efeito do plantio de cana inteira na germinação, no desenvolvimento e na produção da cana-de-açúcar. **Cadernos Planalsucar**, v.3, n.1, p.13-18, 1984.

LEITE, G. H. P.; CRUSCIOL, C. A.; SIQUEIRA, G. F.; SILVA, M. A. Qualidade tecnológica em diferentes porções do colmo e produtividade da cana-de-açúcar sob efeito de maturadores. **Bragantia**, v.69, n.2, p.861-870, 2010.

LEVI, C. A. Froracion de cana de azucar, determinacion de requerimientos indutivos. **Revista Industrial de Tucuman**, v.60, n.1, p.1-15, 1983.

LINGLE, S. E.; WIEGAND, C. L. Soil salinity and sugarcane juice quality. **Field Crops Research**, v.54, n.3, p.259-268, 1997.

LIRA, R. M.; SILVA, E. F. F.; SILVA, G. F.; SOUZA, D. H.; PEDROSA, E. M. R.; GORDIN, L. C. Content, extraction and export of nutrients in sugarcane under salinity and leaching fraction. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, n.6, p.432-438, 2019.

LIRA, R. M.; SILVA, Ê. F. F.; SIMÕES NETO, D. E.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; LIMA, B. L. C.; SILVA, J. S. Growth and yield of sugarcane irrigated with brackish water and leaching fractions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.3, p.170-175, 2018.

LISSON, S. N.; INMAN-BAMBER, N. G.; ROBERTSON, M. J.; KEATING, B. A. The historical and future contribution of crop physiology and modeling research to sugarcane production systems. **Field Crops Research**, v.92, n.4, p.321-335, 2005.

LIU, D. L.; KINGSTON, G.; BULL, T. A. A new technique for determining the thermal parameters of phenological development in sugarcane, including sub optimum and supra-optimum temperature regimes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.90, n.4, p.119-139, 1998.

LUCCHESI, A. A. Cana-de-açúcar. **In**: Castro. P. R. C. Kluge R. A. (Ed). *Ecofisiologia de culturas extrativas: Cana-de-açúcar, Seringueira, Coqueira, Dendezeiro e Oliva*. Cosmópolis: Stoller do Brasil, 2000. p.13-46.

MAAS, E. V. Crop tolerance. **California Agriculture**, v.36, n.1, p.20-21, 1984.

MAAS, E. V.; HOFFMAN, G. J. Crop salt tolerance: Current assessment. **Journal of the Irrigation and Drainage Division ASCE**, v.103, n.2, p.115-134, 1977.

MACHADO, E. C. Fisiologia de produção de cana-de-açúcar. **In**: PARANHOS, S.B. *Cana-de-açúcar: cultivo e utilização*. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v.1, cap.1, p.56-87.

MALAVOLTA, E. **Manual de Nutrição Mineral de Plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.

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

MANSOUR, M. M. F. The plasma membrane transport systems and adaptation to salinity. **Journal of Plant Physiology**, v.171, n.1, p.1787-1800, 2014.

MARIN, F.; NASSIF, D. S. P. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: fisiologia, conjuntura e cenário futuro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.3, p.232-239, 2013.

MARQUES, M. O.; MACIEL, B. F.; FIGUEIREDO, I. C.; MARQUES, T. A. considerações sobre a qualidade da matéria-prima. **In: MARQUES, MO.; MUTTON, M. A.; NOGUEIRA, T. A. R.; TASSO JÚNIOR. L. C.; NOGUEIRA, G. A.; BERNARDI J. H. Tecnologias na agroindústria canavieira. Jaboticabal: UNESP, 2008. p.9-16.**

MCCORMICK, A. J.; CRAMER, M. D.; WATT, D. A. Culm sucrose accumulation promotes physiological decline of mature leaves in ripening sugarcane. **Field Crops Research**, v.108, n.3, p. 250-258, 2008.

MCCORMICK, A. J.; CRAMER, M. D.; WATT, D. A. Sink strength regulates photosynthesis in sugarcane. **New Phytologist**, v.171, n.1, p.759-770, 2006.

MEDEIROS, J. F. **Qualidade de água de irrigação e evolução da salinidade nas propriedades assistidas pelo “GAT” nos estados de RN, PB e CE**. Campina Grande: UFPB, 1992. 173p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 1992.

MEDEIROS, J. F.; GHEYI, H. R.; COSTA, A. R. F.; TOMAZ, H. V. Q. Manejo do solo-água-planta em áreas afetadas por sais. **In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; FILHO, E. G. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. 2.ed., Fortaleza, INCT Sal, 2016. Cap.20, p.319-335.**

MEYSSIGNAC, B.; CAZENAVE, A. Sea level: A review of present-day and recent-past changes and variability. **Journal of Geodynamics**, v.58, n.3, p.96-109, 2012.

MILLER, J. D.; GILBERT, R. A. **Sugarcane Botany: A Brief View**. University of Florida IFAS extension. 2009.

MIRANDA, A. A. **História da cana-de-açúcar**. Ed. Komedi. Campinas, São Paulo, 2008. 168.

MOORE, P. H. Integration of sucrose accumulation processes across hierarchical scales: towards developing an understanding of the genetic-crop continuum. **Field Crops Research**, v.92, n.4, p.119-135, 2005.

MOORE, P. H. Sugarcane Biology, Yield and Potential for Improvement. **In**: Proceeding the Workshop BIOEN on sugarcane improvement, São Paulo, 2009. Disponível em: < http://www.fapesp.br/pdf/bioen1803/Bioen_Moore.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2019.

MOZAMBANI, A. E.; PINTO, A. S.; SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M. História e Morfologia da cana-de-açúcar. **In**: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: CP 2, 2006. 415p.

MUNNS, R. Plant Adaptations to Salt and Water Stress: Differences and Commonalities. **Advances in Botanical Research**, v.57, n.4, p.1-32, 2011.

MUNNS, R. **The impact of salinity stress**. **Plant stress**, Virtual article. Disponível em: <http://www.plantstress.com/Articles/salinity_i/salinity_i.htm>. Acesso em: 26/08/2016.

MUNNS, R.; GILLIHAM, M. Salinity tolerance of crops - what is the cost? **New Phytologist**, v.208, n.3, p.668-673, 2015.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, v.59, n.2, p.651-681, 2008.

NAKANO, O. **Entomologia econômica**. 1.ed. 2011, 464p.

OLIVEIRA, A. R.; BRAGA, M. B.; SIMÕES, W. L.; WALKER, A. M. **Influência de lâminas de irrigação nas características tecnológicas de cana-de-açúcar**. Petrolina: Embrapa Semiárido (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n.127), 2016. 22p.

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I; FREIRE, M. B. G. S.; SIMÕES NETO, D. E.; SILVA, S. A. M. Extração de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar

cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.4, p.1343-1352, 2010.

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, J. F.; OLIVEIRA, R. I.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, M. B. G. S. Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, v.42, n.3, p.579-588, 2011.

OLIVEIRA, M. W.; FREIRE, F. M.; MACÊDO, G. A. R.; FERREIRA, J. J. Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar. **Informe Agropecuário**, v.28, n.239, p.30-43, 2007.

ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: USP-FEALQ, 1983. 369p.

PATADE, V. Y.; BHARGAVA, S.; SUPRASANNA, P. Salt and drought tolerance of 4 sugarcane under iso-osmotic salt and water stress: growth, osmolytes accumulation, 5 and antioxidant defense. **Journal of Plant Interactions**, v.6, n.1, p.275-282, 2011.

PINHEIRO, C. CHAVES, M. M. Photosynthesis and drought: can we make metabolic connections from available data? **Journal of Experimental Botany**, v.62, n.3, p.869-882, 2011.

PIZARRO, F. C. **Riego localizado de alta frecuencia: goteo, microaspersion, exudacion**. 2.ed., Madrid: Mundi Prensa, 1990. 471p.

PLAZEK, A.; TATRZANSKA, M.; MACIEJEWSKI, M.; KOSCIELNIAK, J.; GONDEK, K.; BOJARCZUK, J.; DUBERT, F. Investigation of the salt tolerance of new Polish bread and durum wheat cultivars. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.35, n.2, p.2513-2523, 2013.

PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI, A. M. **Guia de interpretação de análise de solo e foliar**. Vitória, ES: Incaper, 2013. 104p.

PUGA, A. P.; MELO, L. C. A.; ABREU, C. A.; COSCIONE, A. R.; PAZ-FERREIRO, J. Leaching and fractionation of heavy metals in mining soils amended with biochar. **Soil & Tillage Research**, v.164, n.1, p.25-33, 2016.

RAIJ, B. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.

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

RHOADES, J. D.; KANDIAH, A.; MASHALI, A. M. **Uso de águas salinas para produção agrícola**. Campina Grande: UFPB. Estudos da FAO, Irrigação e Drenagem. 2000, 117p.

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

RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: USDA, 1954. 60 p. Handbook, 60.

RIDESA - Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro. **45 anos de variedades RB de cana-de-açúcar: 25 anos de Ridesa**. 1.ed. Curitiba: Graciosa, 2015. 156p.

SANTOS, F.; EICHLER, P.; MACHADO, G.; MATTIA, J.; SOUZA, G. Chapter 2: By-products of the sugarcane industry. **Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives**, v. 1, n.1, p.21-48, 2020.

SANTOS, R. V.; CAVALCANTE, L. F.; VITAL, A. F. M.; LACERDA, C. F.; SOUZA, E. R.; LIMA, G. S. Interação salinidade-fertilidade do solo. **In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; FILHO, E. G.** Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. 2.ed., Fortaleza, INCT Sal, 2016. Cap.18, p.278-293.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. **In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M.** Atualização em produção de cana-de-açúcar. 1.ed. Piracicaba: Livroceres, 2006. p. 19-36.

SENGAR, K.; SENGAR, R. S.; SINGH, A. Biotechnological and genomic analysis for salinity tolerance in Sugarcane. **International Journal of Biotechnology and Bioengineering Research**, v.4, n.5, p.407-414, 2013.

- SHOMEILI, M.; NABIPOUR, M.; MESKARBASHEE, M.; MEMARI, H. R. Effects of gibberellic acid on sugarcane plants exposed to salinity under a hydroponic system. **African Journal of Plant Science**, v.5, n.10, p.609-616, 2011.
- SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; NASCIMENTO, C. W. A.; ROCHA, A. T. Extração de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar e suas relações com a capacidade tampão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.1, p.840-848, 2009.
- SINCLAIR, T. R.; GILBERT, R. A.; PERDOMO, R. E.; SHINE Jr., J. M.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, v.88, n.5, p.171-178, 2004.
- SINGELS, A.; SMIT, M.A.; REDSHAW, K.A.; DONALDSON, R. A. The effect of crop start date, crop class and cultivar on sugarcane canopy development and radiation interception. **Field Crops Research**, v.92, n.1, p.249-260, 2005.
- SMIT, M. A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, v. 98, n.4, p.91-97, 2006.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.
- TARUMOTO, M. B.; ARANA, A. R. A.; FERREIRA, T. E.; SILVA, M. A. Impactos positivos da cultura da cana-de-açúcar no Brasil. **Journal of Agronomic Sciences**, v.4, n.3., p.526-545, 2015.
- THOMAS, J. R.; SALINAS, F. G.; OERTHER, G. F. Use of saline water for supplemental irrigation of sugarcane. **Agronomy Journal**, 73, 1011-1017, 1981.
- TOPPA, E. V. B.; JADOSKI, C. J.; JULIANETTI, A.; HULSHOF, T.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D. Aspectos da fisiologia de produção da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, v.3, n.3, p.215-221, 2010.
- UNICA - União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Balço de atividades 2012/2013 a 2018/2019**: setor sucroenergético. Disponível em: <<https://www.unica.com.br/wp-content/uploads/2019/06/Relatorio-Atividades-201213-a-201819.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2019.

- VASCONCELOS, M. C. C. A. Salinização do solo em áreas irrigadas: Aspectos físicos e químicos. **ACSA – Agropecuária científica no Semi-Árido**, v.10, n.1, p.20-25, 2014.
- VIANA, R. S.; MUTTON, M. A.; ZILLO, H. Índices de maturação da cana-de-açúcar quando submetida à aplicação de maturadores químicos. **Revista Mirante**, v.8, n.1, 2015.
- WACLAWOVSKY, A. J.; SATO, P. M.; LEMBKE, C. G.; MOORE, P. H.; SOUZA, G. M. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. **Plant Biotechnology Journal**, v.8, n.33, p.263-276, 2010.
- WATANABE, K.; NAKABARU, M.; TAIRA, E.; UENO, M.; KAWAMITSU, Y. Relationships between nutrients and sucrose concentrations in sugarcane juice and use of juice analysis for nutrient diagnosis in Japan. **Plant Production Science**, v.19, n.2, p.215-222, 2016.
- WICKE, B.; SMEETS, E.; DORNBURG, V.; VASHEV, B.; GAISER, T.; TURKENBURGA, W.; FAAIJ, A. The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils. **Energy & Dynamic Article**, v.4, n.5, p.2669-2681, 2011.
- WIEDENFELD, B. Effects of irrigation water salinity and electrostatic water treatment for sugarcane production. **Agricultural Water Management**, v.95, n.3, p.85-88, 2008.
- YASAR, A.; SHABBIR, S. A.; TABINDA, A. B.; NAZAR, M.; RASHEED, R.; MUKHTAR, A. M. S. Refuse derived fuels as a renewable energy source in comparison to coal, rice husk, and sugarcane bagasse. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v.41, n.1, p.564-572, 2019.
- YURTSEVEN, E., ÖZTÜRK, H.S., AVCI, S. Mass balance criteria in soil salinity management: different irrigation water qualities and leaching ratio. **Tarım Bilimleri Dergisi**, v.20, n.3, p.103-111, 2014.
- ZHANG, C.; LIA, X.; KANGA, Y.; WANG, X. Salt leaching and response of *Dianthus chinensis* L. to saline water dripirrigation in two coastal saline soils. **Agricultural Water Management**, v.218, n.1, p.8-16, 2019.

CAPÍTULO II

**CRESCIMENTO, PRODUTIVIDADE E QUALIDADE TECNOLÓGICA DA
CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA COM ÁGUAS SALOBRAS E FRAÇÃO DE
LIXIVIAÇÃO**

CRESCIMENTO, PRODUTIVIDADE E QUALIDADE TECNOLÓGICA DA CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA COM ÁGUAS SALOBRAS E FRAÇÃO DE LIXIVIAÇÃO

Resumo: A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma cultura de grande importância socioeconômica e ambiental, sendo o Brasil o maior produtor mundial. Objetivou-se com este trabalho avaliar o crescimento, a produtividade e a qualidade industrial da cana-planta e soca irrigada com águas salobras e condições de lixiviação e a produtividade da ressoca sob regime de sequeiro. O experimento foi realizado na Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brasil. Foi analisada a variedade RB92579 em dois ciclos de cultivo sob irrigação (cana-planta e soca) e um ciclo sob regime de sequeiro (ressoca). O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5 x 2: cinco níveis de salinidade da água de irrigação (CEa: 0,5; 2,0; 4,0; 6,0; 8,0 dS m⁻¹) e condições sem (FL1 = 0) e com fração de lixiviação (FL2 = 0,17), correspondentes a 100 e 120% da evapotranspiração da cultura, com quatro repetições. Os níveis salinos foram obtidos pela adição de NaCl e CaCl₂ a água de distribuição local (0,5 dS m⁻¹). Foi avaliado o crescimento (altura e diâmetro do colmo, número de plantas, área foliar e índice de área foliar) na cana-planta e soca; a produtividade de colmos da cana-planta, soca e ressoca e a qualidade industrial (teor de sólidos solúveis, teor de sacarose, pureza do caldo, açúcares redutores totais, teor de fibras, açúcares totais recuperáveis, rendimento de bruto açúcar e etanol) da cana-planta e cana-soca. A salinidade da água de irrigação reduziu o crescimento, produtividade e qualidade industrial na cana-planta e soca, sendo esse efeito minorado pela fração de lixiviação de 0,17. A salinidade da água de irrigação dos ciclos de cana-planta e soca promoveu efeito residual na produção de biomassa na cana-ressoca conduzida em regime de sequeiro.

Palavras-chave: *Saccharum* spp., análise multivariada, rendimento industrial, salinidade

GROWTH, PRODUCTIVITY AND TECHNOLOGICAL QUALITY OF IRRIGATED SUGARCANE WITH BRACKISH WATER AND LEACHING FRACTION

Abstract: Sugarcane (*Saccharum* spp.) is a crop of great socioeconomic and environmental importance, with Brazil being the largest world producer. The objective of this work was to evaluate the growth, productivity and industrial quality of cane-plant and cane-ratoon irrigated with brackish water and leaching conditions and the productivity of the 2nd ratoon under water regime. The experiment was carried out in drainage lysimeters at the Agricultural Engineering Department of the Federal Rural University of Pernambuco, Recife, PE, Brazil. The RB92579 variety was analyzed in two cultivation cycles under irrigation (cane-plant and ratoon) and one cycle under rainfed regime (2nd ratoon). The design used was completely randomized, arranged in a 5 x 2 factorial scheme: five levels of irrigation water salinity (ECw: 0.5; 2.0; 4.0; 6.0; 8; 0 dS m⁻¹) and conditions without (FL1 = 0) and with leaching fraction (FL2 = 0.17), with four replications. Saline levels were obtained by adding NaCl and CaCl₂ to the water of local distribution (0.5 dS m⁻¹). The growth (stem height and diameter, number of plants, leaf area, and leaf area index) in the cane-plant and clump was evaluated; the sugarcane stalk productivity, planting and drying, and the industrial quality (the content of soluble solids, sucrose content, juice purity, total reducing sugars, fiber content, total recoverable sugars, raw sugar, and ethanol yield) cane-plant and cane-ratoon. The salinity of the irrigation water reduced the growth, productivity, and industrial quality in the cane-plant and cane-ratoon, this effect is lessened by the leaching fraction of 0.17. The salinity of the irrigation water of the cane-plant and cane-ratoon cycles promoted a residual effect on the biomass production in the 2nd ratoon under rainfed conditions.

Keywords: *Saccharum* spp., Multivariate analysis, industrial performance, salinity

CAPÍTULO II: CRESCIMENTO, PRODUTIVIDADE E QUALIDADE TECNOLÓGICA DA CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA COM ÁGUAS SALOBRAS E FRAÇÃO DE LIXIVIAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

A demanda mundial por energias renováveis tem incentivado a busca por bioenergia. A cultura da cana-de-açúcar se destaca como um dos principais commodities agrícolas, pelos seus produtos altamente comercializáveis, além disso, apresenta capacidade de renovação, devido ao aproveitamento de resíduos e a utilização do etanol como combustível renovável, reduzindo o impacto ambiental do sistema de produção (GUERZONI et al., 2014; YASAR et al., 2019).

O Brasil apresenta grande potencial bioenergético, sendo o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. De acordo com a CONAB (2019) a safra 2018/19, gerou uma produção de 620,44 milhões de toneladas numa área de 8,5 milhões de hectares, correspondentes a 34,74 e 33,25% do total mundial, respectivamente, produtividade média de 72,23 Mg ha⁻¹.

Na região Nordeste do país, a área colhida foi de 834,12 mil hectares com uma produtividade média de 49,4 Mg ha⁻¹, bem abaixo da média nacional (CONAB, 2019), principalmente em decorrência dos baixos volumes de chuvas (< 800 mm ano⁻¹) e a irregularidade na distribuição espaço-temporal. Segundo Doorenbos & Kassam (1994), nos trópicos e subtropicais secos para produzir entre 100 a 150 Mg ha⁻¹, a cana-de-açúcar demanda de 1.500 a 2.000 mm por ciclo de 365 dias, assim, o uso de irrigação torna-se necessário para obtenção de produtividades satisfatórias.

A água utilizada na irrigação nessa região, principalmente nos tabuleiros costeiros apresenta em grande parte alto teor de sais, tanto nos açudes de pequeno e médio porte (superficiais) e poços (subterrâneas) (MEDEIROS et al., 2016). A alta salinidade do solo afeta o crescimento de numerosas espécies de plantas, especialmente glicófitas como no caso da cana-de-açúcar que apresenta limiar de 1,7 dS m⁻¹, limite abaixo do qual consegue ter seu desenvolvimento normal, sem efeitos generalizados, sendo classificada como moderadamente sensível (MAAS, 1984).

Segundo Munns & Tester (2008), a resposta das plantas à salinidade acontece em duas fases distintas: a primeira, fase osmótica, em que sais como o Ca²⁺; K⁺, Na⁺ e Cl⁻ atingem as raízes diminuindo o potencial osmótico da relação solo-planta,

dificultando a absorção de água; a segunda, fase iônica, quando o sal atinge a parte aérea em altas concentrações causando toxicidade e, conseqüentemente morte foliar for prejudicando a fotossíntese, o que ocasionará a redução do crescimento, produtividade e qualidade da matéria-prima.

Golabi et al. (2009), avaliando a qualidade industrial de genótipos de cana-de-açúcar (CP48-103, CP57-614 e IRC99-01) irrigadas com águas salobras (CEa = 2,0; 3,0; 4,5 e 6 dS m⁻¹) observaram reduções significativas no teor de sólidos solúveis (°Brix), teor de sacarose (Pol) e Pureza (PZA), bem como aumento no teor de açúcares redutores (AR) e Fibra. Segundo o CONSECAN (2015), esses são principais indicadores de avaliação da qualidade da cana, utilizada para definir o valor a ser pago pela matéria-prima.

De acordo com Puga et al. (2016), nos casos em que os níveis salinos são prejudiciais às plantas, a lixiviação é a chave para a irrigação bem sucedida, sendo o êxito dessa operação dependente essencialmente da existência de um sistema de drenagem eficiente. A fração de lixiviação é a razão entre lâmina necessária para satisfazer a demanda hídrica da cultura e a lâmina que percola abaixo da zona radicular, sendo calculada em função da condutividade elétrica da água de irrigação e da condutividade elétrica da água drenada (AYERS & WESTCOT, 1999; PUGA et al., 2016; ZANG et al., 2019).

Apesar da importância da cana-de-açúcar para o país, ainda são escassos os estudos avaliando a resposta da cultura sob estresse salino, principalmente utilizando variedades recentemente disponibilizadas. Assim, objetivou-se avaliar o crescimento, a produtividade e a qualidade industrial da cana-de-açúcar (RB92579) irrigada com águas salobras e condições de lixiviação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização e caracterização da área de estudo

O experimento foi conduzido na Estação de Agricultura Irrigada Prof. Ronaldo Freire de Moura, localizada no Departamento de Engenharia Agrícola (DEAGRI) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife, PE, Brasil (8° 01' 06" de latitude Sul; 34° 56' 49" de longitude Oeste; 6,5 m altitude em relação ao nível do mar) pelo sistema SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas).

O clima da região é do tipo As, megatérmico tropical (tropical úmido) de acordo com a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013). A precipitação pluvial média

anual é de 2.263,5 mm ano⁻¹, sendo que a maior concentração ocorre entre o outono e o inverno, com uma média de 388,1 mm no mês de julho; as temperaturas médias da máxima e mínima do ar de 29,1 e 21,8 °C, respectivamente; a umidade relativa do ar média anual é 79,8%. A evapotranspiração total média estimada encontra-se entre 1000 e 1600 mm ano⁻¹ (BARROS, 2019; INMET, 2019).

A área experimental possui dimensões de 32 x 75 m (2400 m²), sendo localizada na parte central uma estação lisimétrica (18 x 25,8 m) e uma estação meteorológica automática (18 x 14,2 m) (Campbell Scientific, CR1000) utilizada para obtenção de dados climáticos (precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar global), para manejo da irrigação.

A estação lisimétrica é composta por 40 lisímetros de drenagem de cimento reforçado com fio sintético, com capacidade de 1 m³, diâmetro externo na borda superior 1.380 mm e altura externa de 745 mm, ficando uma borda de 0,10 m acima da superfície do solo, para evitar a entrada de água de chuva ou irrigação, proveniente do escoamento superficial. Os lisímetros foram conectados a uma casa de alvenaria (4 x 4 m) por meio de um sistema de drenagem subterrânea com tubos de PVC (DN 50 mm).

Os lisímetros foram preenchidos com solo (camada 0-0,40 m) proveniente do Município de Goiana, PE (7° 33' 38" de latitude Sul e 35° 00' 09" de longitude Oeste e altitude de 13 m) classificado como Espodossolo Humilúvico de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (SANTOS et al., 2013), correspondente a Spodosol Orthod na classificação U.S. Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2014). As características físico-químicas e hídricas foram determinadas segundo metodologia da EMBRAPA (2011) são apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1. Atributos físico-químicos e hídricos do Espodossolo Humilúvico, Goiana - PE

Atributos Químicos do solo	Valores
pH (H ₂ O)	6,50
P (mg dm ⁻³)	49,00
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,60
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,65
Na ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,06
K ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,08
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0
H (cmol _c dm ⁻³)	3,05
H ⁺ +Al ³⁺	3,05
Cu ²⁺ (mg dm ⁻³)	0,78
Zn ²⁺ (mg dm ⁻³)	0,43
Mn ²⁺ (mg dm ⁻³)	0,62
Soma de Bases (cmol _c dm ⁻³)	2,39
Capacidade de troca de cátions (cmol _c dm ⁻³)	5,44
Saturação por bases -V (%)	44,26
Saturação por alumínio - m (%)	0
Materia Orgânica (g kg ⁻¹)	15,35
CEes (dS m ⁻¹)	0,42
Porcentagem de sódio trocável (%)	1,10
Atributos físico-hídricos do solo	Valores
Areia (g kg ⁻¹)	890,00
Silte (g kg ⁻¹)	30,00
Argila (g kg ⁻¹)	80,00
Densidade do solo - D _s (g cm ⁻³)	1,69
Densidade de partículas - D _p (g cm ⁻³)	2,63
Umidade volumétrica - θ: 0,33atm (%)	3,02
Umidade volumétrica - θ: 0,15atm (%)	1,34

2.2. Plantio e manejo da cultura

A variedade de cana-de-açúcar utilizada foi RB92579, sendo a segunda mais plantada no Brasil e primeira na região semiárida do Nordeste na safra 2016/2017 segundo o Censo Varietal do Instituto Agrônomo de Campinas realizado por Braga Júnior et al. (2018). No plantio, foram abertos sulcos com 0,15 m de profundidade e espaçados a cada 1,2 m, sendo distribuídos seis rebolos (~ 0,30 m cada) por metro linear, com duas gemas cada, realizando-se um desbaste após a emergência para permanência de 8 plantas m⁻¹.

Foram avaliados dois ciclos de cultivo irrigados da cana-de-açúcar (RB92579), sendo a cana-planta com plantio e colheita em novembro 2016 e novembro de 2017, respectivamente, a cana-soca com colheita em novembro de 2018. Além disso, foi conduzido de novembro de 2018 a novembro de 2019, a cana-ressoca em regime de sequeiro.

Na cana-planta foi realizada adubação mineral, sendo aplicado na fundação 20 kg ha⁻¹ de N, 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 35 kg ha⁻¹ de K₂O nas formas de ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio, respectivamente; aos 45 e 150 dias após o plantio (DAP) foi realizada a adubação de cobertura aplicando-se 20 kg ha⁻¹ de N e 35 kg ha⁻¹ de K₂O. A aplicação de micronutrientes foi realizada via adubação foliar aplicando-se 1,3 kg ha⁻¹ Cu, 2,0 kg ha⁻¹ de Zn e 2,6 kg ha⁻¹ de Mn. No segundo ciclo (cana-soca), foi realizada aos 30, 90 e 150 dias após o corte (DAC) a adubação de cobertura aplicando-se 30 kg ha⁻¹ de N e 40 kg ha⁻¹ de K₂O. Também foi realizada a adubação foliar com 1,3 kg ha⁻¹ Cu, 2,0 kg ha⁻¹ de Zn e 2,6 kg ha⁻¹ de Mn. No terceiro ciclo (cana-ressoca) conduzida em sequeiro, foi realizada adubação com 30 kg ha⁻¹ de N e 40 kg ha⁻¹ de K₂O aos 30 e 120 dias após o corte (DAC), para esse ciclo não foi realizada adubação foliar.

2.3. Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 5 x 2, com quatro repetições: cinco níveis de salinidade da água de irrigação (CEa: 0,5; 2,0; 4,0; 6,0 e 8,0 dS m⁻¹) e as condições sem (FL1 = 0) e com fração de lixiviação (FL2 = 0,17), correspondentes a 100 e 120% da evapotranspiração da cultura (ETc).

2.4. Manejo de irrigação e balanço hídrico

No primeiro ciclo de cultivo (cana-planta) houve diferenciação dos tratamentos a partir dos 60 dias após o plantio (DAP), visto que na fase inicial a planta é mais sensível a salinidade, já no segundo ciclo de cultivo (cana-soca) a diferenciação dos tratamentos ocorreu aos 45 dias após o corte (DAC). Do plantio até 60 DAP e 45 DAC para cana-planta e soca, respectivamente, as irrigações foram realizadas com água de abastecimento local (CEa = 0,5 dS m⁻¹) com base na lâmina de reposição de 100% evapotranspiração da cultura (ETc).

Os níveis de salinidade da água de irrigação foram obtidos com adição de NaCl e CaCl₂.H₂O (P.A.) na proporção de 1:1 molar (Ca:Na) a água de abastecimento local (CEa = 0,5 dS m⁻¹) conforme Richards (1954):

$$Q_s = 640 \times CEa, \text{ quando } CEa < 5,0 \text{ dS}^{-1}$$

$$Q_s = 800 \times CEa, \text{ quando } CEa > 5,0 \text{ dS}^{-1}$$

em que,

Q_s - quantidade de sais (mg L^{-1}); CEa - valor desejado da condutividade elétrica da água (dS m^{-1}).

Foi utilizado o sistema de irrigação por gotejamento com gotejadores autocompensantes de perda de carga hidráulica (tipo PCJ/CNL NetafimTM), espaçados a 0,30 m, vazão unitária de $4,1 \text{ L h}^{-1}$ e intensidade de aplicação de $11,40 \text{ mm h}^{-1}$. Para a aplicação das soluções irrigantes foi utilizado bombas centrífugas de eixo horizontal (Modelo QB80, 0,5 CV).

As irrigações foram realizadas diariamente com base na ET_c para reposição das lâminas de 100% e 120% da ET_c :

$$ET_c = ETo \times Kc \times Kl_{med}$$

em que,

ET_c = evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1}); ETo = evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); Kc = coeficiente de cultivo (adimensional); Kl_{med} = coeficiente de localização médio, (adimensional), determinado segundo metodologia proposta por Keller & Bliesner (1990).

A ETo foi determinada a partir de dados climáticos coletados na estação meteorológica automática, sendo os mesmos utilizados no método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998):

$$ET_{O_{PM-FAO56}} = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \left(\frac{900}{t_{med} + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

em que,

Rn - saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G - fluxo de calor no solo ($G = 0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); γ - constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); t - temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$); u_2 - velocidade do vento (m/s); $e_s - e_a$ - déficit de saturação do ar (kPa); Δ - declividade da curva de pressão de vapor d'água ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

O Kc utilizado foi correspondente a cada fase fenológica da planta, de acordo com Doorenbos & Pruitt (1977):

Tabela 2. Valores do Kc para cana-de-açúcar

Estádio de desenvolvimento	Kc
Do plantio até 0,25 de cobertura	0,50
De 0,25 a 0,5 de cobertura	0,80
De 0,5 a 0,75 de cobertura	0,95
De 0,75 a cobertura completa	1,10

Utilização máxima	1,20
Início da maturação	0,95
Maturação	0,70

Fonte: Doorenbos & Pruitt (1977).

Na cana-planta (Figura 1A), a lâmina de água recebida via precipitação pluvial (P) ao longo do período foi de 1629 mm, valor abaixo da média histórica para o município que é de 2263 mm ano⁻¹ de acordo com o INMET (2019). A maior concentração das chuvas ocorreu nos meses de março a junho de 2017, sendo acumulado nesse período um total de 1042 mm.

O período de maior déficit hídrico ocorreu nos meses de novembro de 2016 a fevereiro de 2017 (DEF = 325 mm), que compreende as fases de brotação e perfilhamento, onde o suprimento hídrico se faz imprescindível para garantir o estabelecimento da cultura. O déficit hídrico total foi de 506 mm. Os maiores valores de excedente hídrico foram observados entre os meses de março a junho (EXC = 888 mm), sendo o total no ciclo de 1092 mm.

A evapotranspiração de referência (ET_o) acumulada ao longo do ciclo de cultivo foi de 1308 mm (3,56 mm dia⁻¹). As lâminas de irrigação aplicadas com base em 100% e 120% da evapotranspiração da cultura, correspondentes as condições sem (FL1 = 0) e com lixiviação (FL2 = 0,17), foram de 610 e 717 mm, respectivamente, responsáveis por suprir a necessidade hídrica da cultura, principalmente no período de maior deficiência hídrica.

Na cana-soca (Figura 1B), a lâmina de precipitação pluvial foi de 1710 mm, sendo o acumulado entre os meses de março a junho de 2018 um total de 1069 mm. Os totais de DEF e EXC totais no período foi de 423 e 1176 mm. A ET_o acumulada ao longo do ciclo de cultivo foi de 1190 mm (3,24 mm dia⁻¹). As lâminas de irrigação aplicadas na condição FL1 e FL2, foram de 422 e 490 mm.

Na cana-ressoca (Figura 1C), conduzida em regime de sequeiro ocorreu um total de precipitação pluvial de 2234 mm, valor próximo ao esperado pela média histórica para o município. A maior parte ficou concentrada entre os meses de março a junho de 2018, sendo acumulado nesse período um total de 1586 mm, gerando um EXC de 1345 mm. Os totais de DEF e EXC totais no período foi de 316 e 1742 mm.

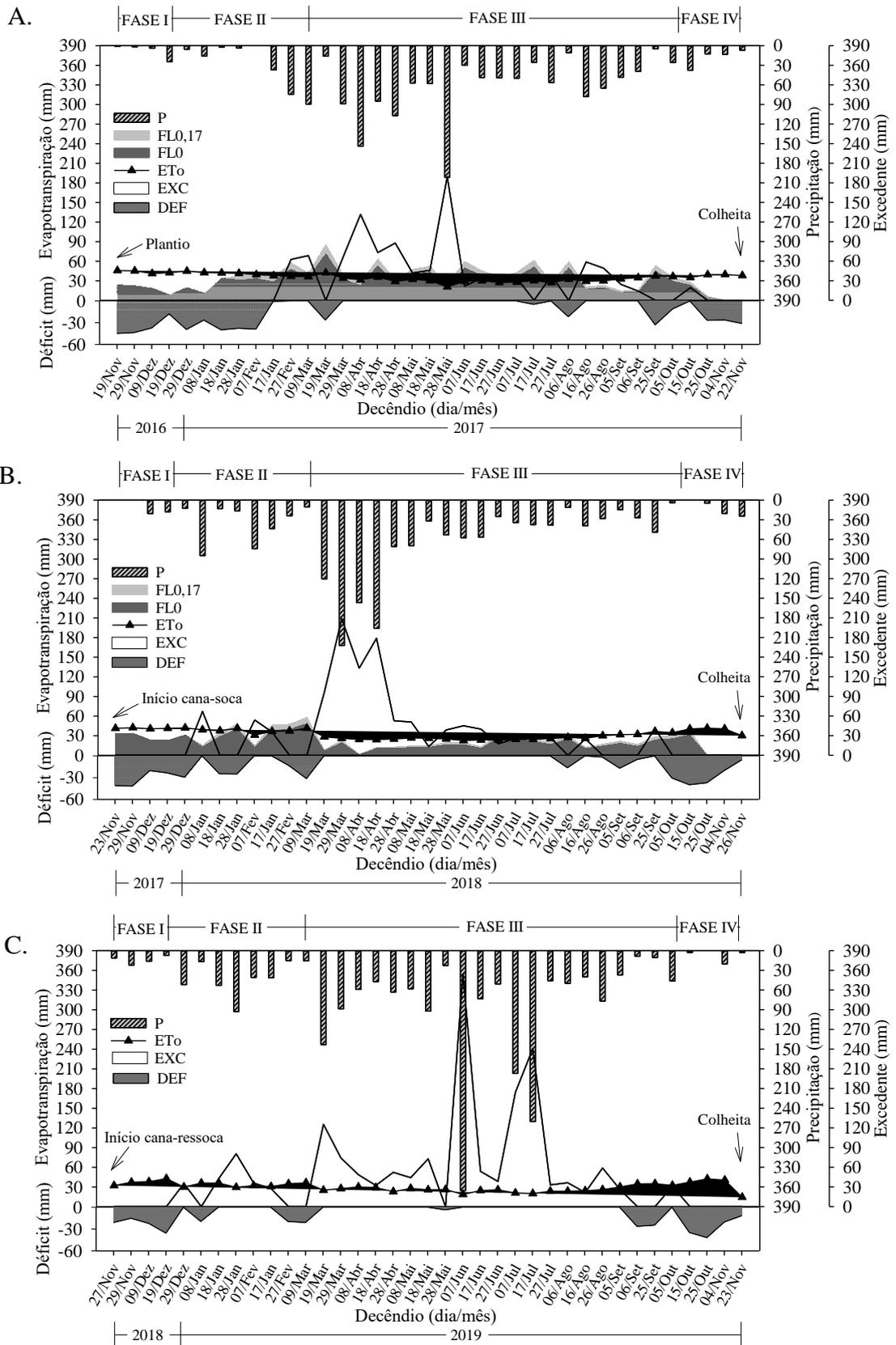


Figura 1. Balanço hídrico decenal durante os ciclos de cana-planta (A), cana-soca (B) e cana-ressoca (C).

2.5. Avaliação do crescimento

Foram realizadas as seguintes medições mensais na cana-planta dos 60 aos 365 DAP e na cana-soca dos 45 aos 365 DAC: altura dos colmos (AC); diâmetro dos colmos (DC), número de plantas (NP), comprimento (CF+3) e largura mediana foliar (LF+3), número de folhas verdes (NFV) e número de folhas secas (NFS); área foliar (AF) e índice de área foliar (IAC), sendo todas essas medições realizadas em três plantas previamente identificadas em cada parcela.

A determinação AC (cm) foi feita com uma fita métrica, sendo a medida feita da superfície do solo até a altura da intersecção do limbo com a bainha da folha +1, que é primeira folha da bainha visível conhecida como folha TVD (Top Visible Dewlap) de acordo com Kuijper (DILLEWIJN, 1952). O DC (mm) foi medido na altura correspondente a 1/3, a partir da base do colmo, com auxílio de paquímetro. O NP (unidades por metro linear) feito por meio da contagem do número de plantas. O CF+3 (cm) e LF+3 (cm) foram feitos a partir da medição na terceira folha +3 levando consideração os extremos com o auxílio de fita métrica. Em cada avaliação, foi feita a contagem do NFV (número de folhas verdes planta⁻¹) e NFS (número de folhas secas planta⁻¹), considerando como folhas verdes, aquelas totalmente expandidas com pelo menos 20% de área foliar verde, a partir da folha +1.

Com dados de CF, LF e NFV, determinou-se a área foliar por planta (AF) das folhas verdes por meio da metodologia proposta por Hermann & Câmara (1999), conforme a equação a seguir:

$$AF = CF \times LF \times 0,75 \times (NFV+2)$$

em que,

AF - área foliar, m²; C - comprimento da folha, m; L: largura da folha, m; 0,75: fator de correção para área foliar da cultura, adimensional; N: número de folhas abertas com pelo menos 20% de área verde.

O IAC foi determinado pela relação entre AF da planta e a superfície do solo por ela ocupada, seguindo a metodologia de Watson (1947):

$$IAF = \frac{AF}{AOPS}$$

em que,

IAC - índice de área foliar, m² folhas m⁻² de solo; AF - área foliar, m²; AOPS - área ocupada pela planta no solo (espaçamento = 1,2 entre linhas x 0,15 entre plantas), m².

2.6. Avaliação da produção de biomassa e qualidade tecnológica

Com a finalidade de se ter um indicativo do momento ideal de colheita, a partir dos 240 DAP e DAC para cana-planta e soca, respectivamente, foram iniciadas em intervalos 30 dias leituras do teor de sólidos solúveis (°Brix) para determinação do índice de maturação (IM) de acordo com Galdiano (2008):

$$IM = \frac{^{\circ}\text{Brix}_{\text{ponta}}}{^{\circ}\text{Brix}_{\text{base}}}$$

em que,

$^{\circ}\text{Brix}_{\text{base}}$ - leitura do °Brix refratométrico no 2° entrenó de baixo para cima; $^{\circ}\text{Brix}_{\text{ponta}}$ - leitura do °Brix refratométrico no 2° entrenó abaixo do ponteiro. Interpretação dos resultados: $IM < 0,60$: cana verde; $0,60 < IM < 0,85$: cana em maturação; $0,85 < IM < 1,00$: cana madura, pronta para ser cortada. $IM > 1,00$: cana em declínio de maturação.

Aos 365 DAP (cana-planta) e 365 DAC (cana-soca e ressoça), foi realizada a colheita da cana-de-açúcar, sendo coletadas todas as plantas dos lisímetros; após o corte das plantas, as mesmas foram separadas em colmos e ponteiro + folha. Os colmos pesados para obtenção da biomassa verde por parcela, em seguida obtida a produtividade de colmos (TCH, Mg ha⁻¹), por meio da relação com a área da parcela.

Com os dados de TCH dos primeiro (cana-planta) e segundo ciclos (cana-soca) realizada a estimativa da produtividade de colmos para cinco colheitas (TCH₅) de acordo com Silva et al. (2014a):

$$TCH_5 = \frac{TCH_1 + 3,5 \times TCH_2}{5}$$

em que,

TCH₁ - valor da produtividade na primeira colheita (Mg ha⁻¹); TCH₂ - valor da produtividade na segunda colheita (Mg ha⁻¹).

Após a pesagem dos colmos, foi retirada uma amostra de três plantas por parcela (12 plantas por tratamento), em seguida os colmos foram cortados em rebolos (~ 0,30 m) e coletado uma subamostra de 15 rebolos os quais foram devidamente identificados e levados para o laboratório de Análise Química da Usina Petribu S.A., para determinação dos seguintes parâmetros tecnológicos: sólidos solúveis no caldo (°Brix), teor de sacarose no caldo (Pol_{caldo}), teor de sacarose na cana (Pol_{cana}), pureza do caldo (PZA), açúcares redutores totais do caldo (AR_{caldo}), teor de fibras (F), açúcares totais recuperáveis (ATR) de acordo com a metodologia do CONSECAN (2015).

Com base nestes parâmetros tecnológicos foram calculados os rendimentos de açúcar (RBAÇ, Mg ha⁻¹) e de etanol (RBET, m³ ha⁻¹) conforme metodologia proposta por Caldas (1998):

$$RBAÇ = \frac{Pol \times TCH}{100}$$

$$RBET = \frac{[(Pol \times f_{RBET}) + AR] \times fg \times TCH}{100}$$

em que,

Pol - teor de sacarose no caldo, %; TCH - produtividade de colmos, Mg ha⁻¹; f_{RBET} - fator de transformação estequiométrica de sacarose em uma molécula de glicose mais uma de frutose, igual a 1,052; AR - açúcares redutores totais do caldo, %; fg - fator de Gay-Lussac, igual a 0,6475.

2.7. Análise estatística

Os dados de qualidade industrial e biomassa verde foram submetidos ao teste de normalidade, homocedasticidade e análise de variância (ANOVA) pelo teste F ($p \leq 0,05$). Em seguida, os efeitos significativos para o fator salinidade foram comparados mediante análise de regressão ($p \leq 0,05$). A escolha do modelo de regressão baseou-se no maior valor de coeficiente de determinação (R^2), na significância dos parâmetros da equação de ajuste ($p \leq 0,05$), no efeito não significativo do desvio de regressão e na resposta biológica de cada variável em função dos tratamentos. As condições de lixiviação dentro de cada nível de salinidade foram comparadas pelo teste de médias de Tukey ($p \leq 0,05$). As análises foram realizadas utilizando-se o software STATÍSTICA versão 10.0 (STATSOFT, 2010).

Na possibilidade de utilização do modelo de parcela subdividida no tempo para os dados de crescimento coletados ao longo dos ciclos de cultivo da cana-planta e soca, foi utilizado o teste de esfericidade de Mauchly e, sendo esta condição significativa ($p \leq 0,05$), foi realizado o teste de MANOVA (análise multivariada) e os tratamentos ajustados por meio de modelos de regressão múltipla (superfície de resposta), considerando o tempo (DAP e DAC) e salinidade (CEa) como variáveis independentes. As análises foram realizadas utilizando o software STATÍSTICA versão 10.0 (STATSOFT, 2010).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise de crescimento

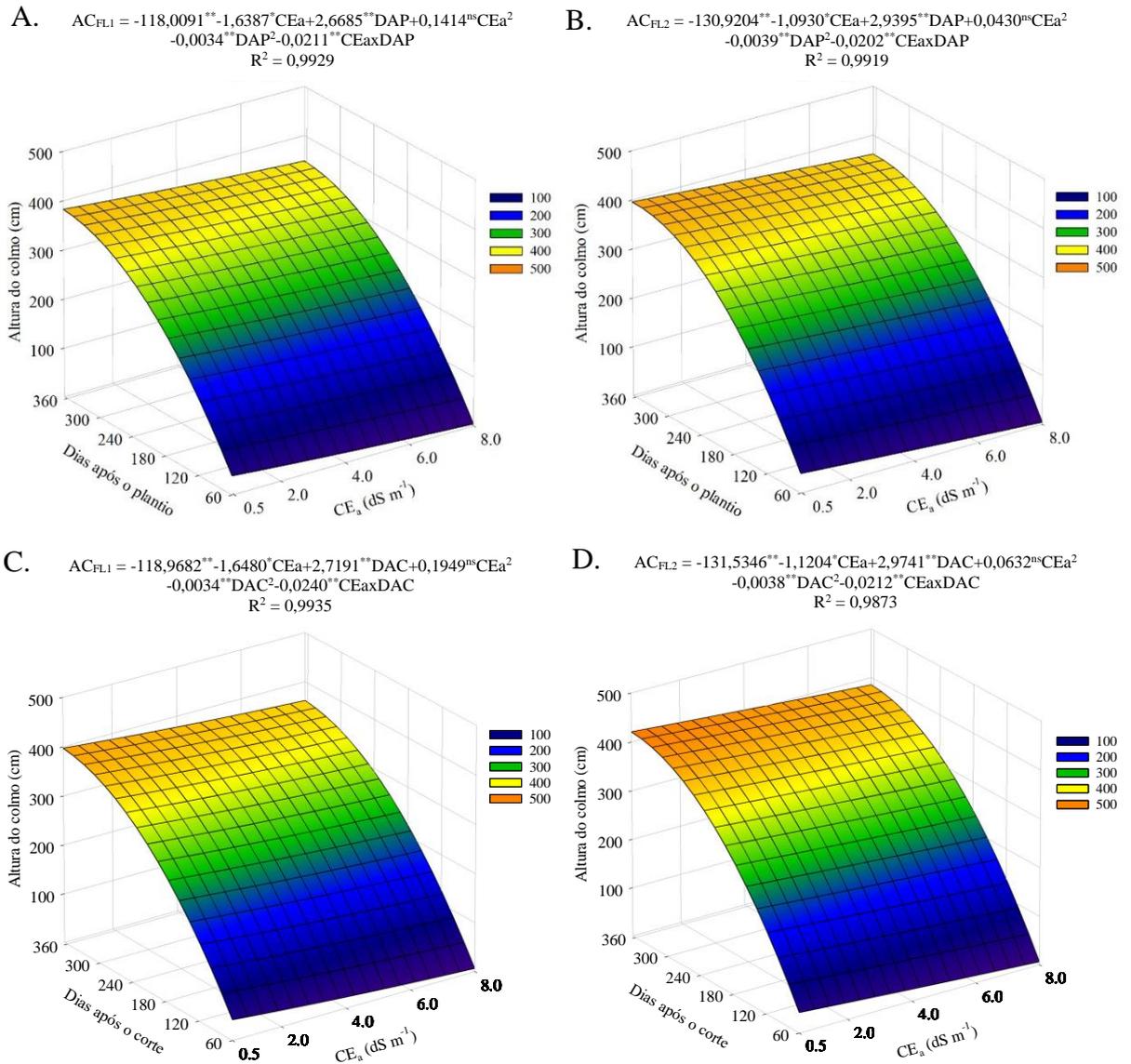
A análise multivariada evidenciou efeito significativo ($p \leq 0,05$) nas variáveis de crescimento altura de colmo (AC), número de plantas (NP), área foliar (AF) e índice de área foliar (IAF) para ambos os ciclos de cultivo (cana-planta e cana-soca) de acordo com os testes de Wilks, Pillai, Hotelling-Lawley e Roy para a fonte de variação tempo, a interação do tempo x salinidade, a interação do tempo x condição de lixiviação e a interação de tempo x salinidade x condição de lixiviação. Para o diâmetro do colmo (DC), houve diferença significativa ($p \leq 0,05$) para a fonte de variação tempo, a interação do tempo x salinidade, a interação do tempo x condição de lixiviação e a interação de tempo x salinidade x condição de lixiviação apenas para o teste de Roy para cana-planta e soca.

As superfícies de resposta para a altura de colmos (AC) na cana-planta em função dos níveis de salinidade da água de irrigação e dias após o plantio para as condições sem (FL1 = 0) e com fração de lixiviação (FL2 = 0,17) são apresentadas na Figura 2A e 2B, respectivamente. Observa-se decréscimos de 1,6387 e 1,0930 cm na altura do colmo para cada incremento unitário da condutividade elétrica da água de irrigação (CEa), para as condições FL1 (Figura 2A) e FL2 (Figura 2B). A salinidade (CEa = 8,0 dS m⁻¹) promoveu reduções médias na altura das plantas de 13,34 e 12,90% para FL1 e FL2, respectivamente, quando comparadas as plantas irrigadas com água de abastecimento (CEa = 0,5 dS m⁻¹).

Garcia & Medina (2010) observaram reduções de até 34,8% na altura de plantas de cana-de-açúcar (PR692176 e V78-1), na fase de crescimento inicial. De acordo com Taiz et al. (2017), o excesso de sais na solução do solo modifica as atividades metabólicas celulares, limitando elasticidade da parede celular, reduzindo o alongamento celular e, conseqüentemente, crescimento vegetal.

De acordo com a derivada parcial da equação, a maior AC (Figuras 2A e B) foi obtida aos 365 dias após o plantio (DAP) no menor nível de salinidade da água de irrigação (CEa = 0,5 dS m⁻¹), sendo de 382,7 cm e 396,8 cm para as condições sem (FL1) e com fração de lixiviação (FL2), respectivamente, um aumento percentual de 3,5% quando utilizado a fração de lixiviação 0,17. Para a mesma data e no maior nível de salinidade (CEa = 8,0 dS m⁻¹) as respectivas alturas para FL1 e FL2 foram 347,97 e 360,67 cm (+3,65%), respectivamente. Segundo Zhang et al. (2019) o uso da fração de

lixiviação no controle de sais no solo, permite o deslocamento destes sais provenientes da água de irrigação para áreas mais profundas que a zona radicular e, conseqüentemente, promove um maior desenvolvimento das plantas.



** , * - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e, ^{ns} - não significativo pelo teste F.

Figura 2. Superfície de resposta da altura do colmo (AC) da cana-de-açúcar submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com fração de lixiviação (FL2) para cana-planta (A e B) e cana-soca (C e D), respectivamente.

Para cana-soca (Figuras 2C e D) observa-se decréscimos de 1,6480 e 1,1204 cm na altura do colmo para cada incremento unitário da condutividade elétrica da água de irrigação, para as condições FL1 (Figura 2C) e FL2 (Figura 2D). Foram observadas reduções médias no crescimento de 13,26 e 12,50% para FL1 e FL2, respectivamente. A

maior AC na cana-soca foi obtida aos 365 dias após o corte (DAC) $CEa = 0,5 \text{ dS m}^{-1}$, sendo de 397,1 e 420,8 cm (+5,9%) para FL1 e FL2, respectivamente. Na $CEa = 8,0 \text{ dS m}^{-1}$ foram observadas alturas de plantas de 361,4 e 384,82 cm (+6,5%), respectivamente.

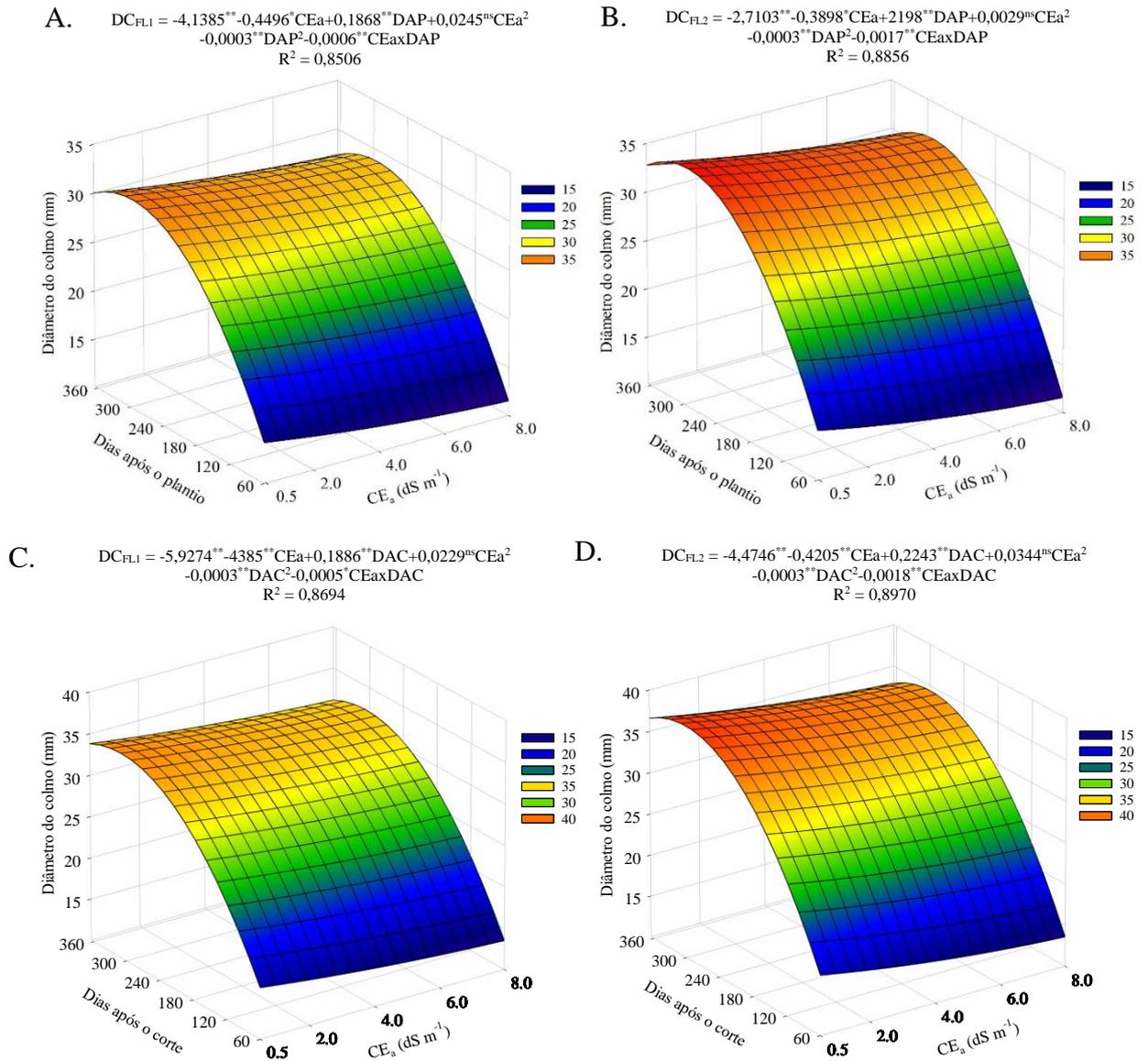
Na cana-soca foram observadas maiores alturas de plantas em relação a cana-planta, fato este justificado pelas maiores lâminas de precipitação pluvial ocorridas durante este ciclo, que promoveu a lixiviação dos sais da zona radicular da cultura e mitigou os efeitos da salinidade.

Estudo realizado por Lira et al. (2018) com a variedade RB867515 submetida a níveis de salinidade da água de irrigação (0,5; 2,0; 3,5; 5,0 e 6,5 dS m^{-1}) e as condições sem (FL = 0) e com fração de lixiviação (FL = 0,17) em Recife - PE, observaram altura máxima de 493 cm no menor nível de salinidade da água de irrigação, não sendo observada diferença significativa entre as condições de lixiviação.

As superfícies respostas para variável diâmetro do colmo (DC) na cana-planta em função da CEa e dos dias após o plantio para as condições de lixiviação FL1 e FL2 são apresentadas na Figura 3A e B, respectivamente. Para essa variável, houve um decréscimo de 0,4496 e 0,3898 mm para cada incremento unitário da salinidade da água de irrigação para FL1 e FL2, respectivamente. Em média, a salinidade promoveu reduções no diâmetro das plantas de 10,11 e 12,17% para FL1 e FL2, respectivamente.

Pela derivada parcial da equação do DC, o maior valor foi observado aos 288 DAP na $CEa = 0,5 \text{ dS m}^{-1}$, sendo de 31,55 e 34,74 mm para FL1 e FL2, respectivamente, um aumento de 10,12% quando utilizou-se a fração de lixiviação 0,17. Para as respectivas datas e, sendo no maior nível de salinidade ($CEa = 8,0 \text{ dS m}^{-1}$) o DC foi de 28,8 e 31,2 mm (+8,07%), para FL1 e FL2, respectivamente.

Na cana-soca (Figura 3C e D), cada incremento unitário da salinidade da água de irrigação promoveu decréscimos de 0,4385 e 0,4205 mm no diâmetro do colmo para as condições FL1 (Figura 3C) e FL2 (Figura 3D). Em média foram observadas reduções de 9,2 e 11,57% para FL1 e FL2, respectivamente, nas plantas irrigadas com a salinidade de $8,0 \text{ dS m}^{-1}$ quando comparada àquelas irrigadas com água de abastecimento ($CEa = 0,5 \text{ dS m}^{-1}$). Os maiores valores médios de DC foram obtidos aos 307 dias após o corte (DAC) $CEa = 0,5 \text{ dS m}^{-1}$, sendo de 34,8 e 38,1 mm (+6,0%) para FL1 e FL2, respectivamente. Na $CEa = 8,0 \text{ dS m}^{-1}$ foram observados diâmetros dos colmos de 32,1 e 34,9 mm (+7,1%), respectivamente.



**, * - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e, ^{ns} - não significativo pelo teste F.

Figura 3. Superfície de resposta do diâmetro do colmo (DC) da cana-de-açúcar submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com fração de lixiviação (FL2) para cana-planta (A e B) e cana-soca (C e D), respectivamente.

Estudos realizados por Simões et al. (2016), em Petrolina, PE, avaliando o efeito da salinidade da água de irrigação ($CEa = 0,1; 2,0; 4,0; 6,0$ e $8,0 \text{ dS m}^{-1}$) no crescimento inicial em dez variedades de cana, inclusive RB92579, observaram diminuição significativa no diâmetro do colmo das plantas em função do aumento da salinidade, independentemente da variedade estudada. Souto Filho (2013), avaliando duas variedades de cana-de-açúcar, SP813250 e RB92579, irrigadas com água salobra ($CEa = 0,6; 1,6; 2,6; 3,6$ e $4,6 \text{ dS m}^{-1}$) observou que o diâmetro do colmo não foi afetado pela

salinidade da água até 230 dias após o plantio, no entanto, após este período, observou-se diferença significativa sendo que a variedade RB92579 apresentou a maior média.

Segundo Oliveira et al. (2011) diâmetro do caule é um parâmetro que depende não apenas das características da variedade, mas também do número de perfilhos, espaçamento utilizado e das condições ambientais. Ainda de acordo com os autores, sob estresse salino é comum ocorrerem alterações morfológicas e anatômicas nas plantas.

As superfícies de resposta para o número de plantas (NP) na cana-planta em função dos níveis de salinidade da água de irrigação e dias após o plantio para as condições de lixiviação FL1 e FL2 são apresentadas na Figura 4A e B, respectivamente. Houve decréscimos de 0,1950 e 0,1897 unidades de plantas para cada incremento unitário da CEa nas condições FL1 e FL2.

O maior NP (Figura 4A e B) foi obtido aos 155 DAP no menor nível de salinidade da água de irrigação ($CEa = 0,5 \text{ dS m}^{-1}$), com valor médio de 13,26 plantas por metro linear. No maior nível de salinidade ($8,0 \text{ dS m}^{-1}$), o NP para as condições de lixiviação FL1 e FL2 foram 11,64 e 12,16 plantas por metro linear (+4,5%), respectivamente. Após essa data, o NP diminuiu em todos os tratamentos até a colheita, observando-se sempre uma maior redução à medida que se aumentava os níveis de salinidade da água, sendo esse efeito atenuado com a fração de lixiviação de 0,17.

Para cana-soca (Figura 4C e D), observa-se decréscimos de 0,2822 e 0,0833 unidades de plantas para cada incremento unitário da CEa nas condições FL1 e FL2, respectivamente. Em média foram observadas reduções no NP de 13,77 e 10,46% para FL1 e FL2, respectivamente, na salinidade de $8,0 \text{ dS m}^{-1}$ quando comparada com água de abastecimento ($CEa = 0,5 \text{ dS m}^{-1}$).

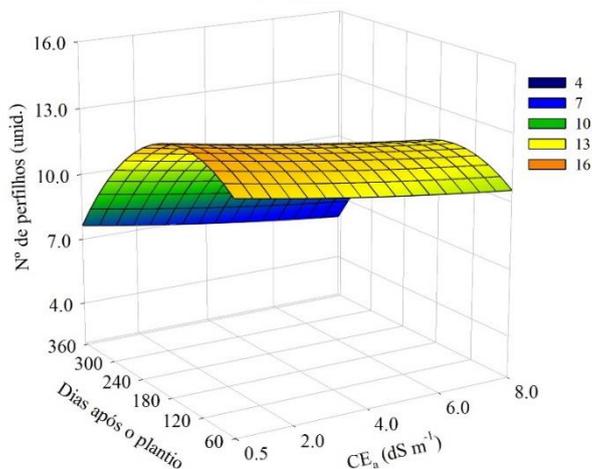
Aos 155 DAC foi observado o maior NP na $CEa = 0,5 \text{ dS m}^{-1}$ sendo 14,35 e 15,42 plantas por metro linear (+7,4%) para FL1 e FL2, respectivamente. Na salinidade de $8,0 \text{ dS m}^{-1}$, o NP foi 12,59 e 13,99 plantas por metro linear (+4,5%) para as respectivas condições de lixiviação.

Segundo Manhães et al. (2015) após as plantas atingirem o perfilhamento máximo, elas começam a competir por fatores de crescimento, como luz, água e espaço, o que reduz sua quantidade. Lira et al. (2018), obteve um máximo perfilhamento de 10,85 e 12,4 perfilhos nas frações de lixiviação de 0 e 0,17, respectivamente, com a variedade RB 867515 aos 120 DAP.

A.
$$NP_{FL1} = 10,0161^{**}-0,1950^{*}CEa+0,0411^{**}DAP+0,0081^{ns}CEa^2$$

$$-0,0001^{**}DAP^2-0,0004^{**}CEaxDAP$$

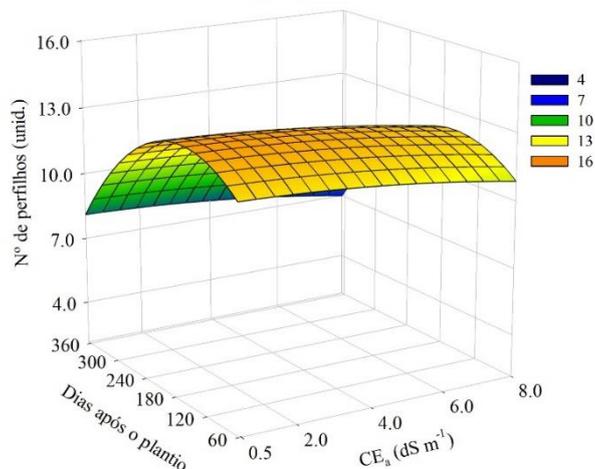
$$R^2 = 0,8017$$



B.
$$NP_{FL2} = 9,1767^{**}-0,1897^{**}CEa+0,0441^{**}DAP+0,0161^{ns}CEa^2$$

$$-0,0001^{**}DAP^2-0,0011^{**}CEaxDAP$$

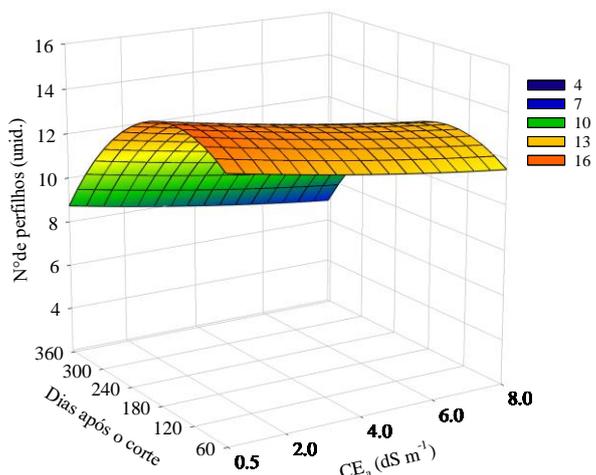
$$R^2 = 0,7475$$



C.
$$NP_{FL1} = 11,5057^{**}-0,2822^{**}CEa+0,0384^{**}DAC+0,0093^{ns}CEa^2$$

$$-0,0001^{**}DAC^2-0,0001^{**}CEaxDAC$$

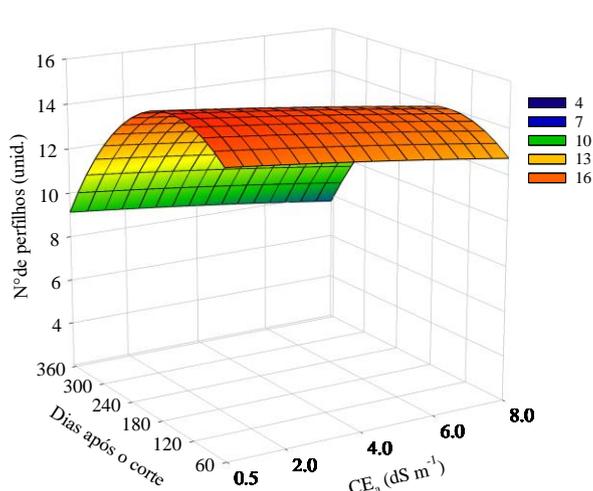
$$R^2 = 0,8225$$



D.
$$NP_{FL2} = 11,7953^{**}-0,0833^{**}CEa+0,0455^{**}DAC+0,0040^{ns}CEa^2$$

$$-0,0001^{**}DAC^2-0,0003^{**}CEaxDAC$$

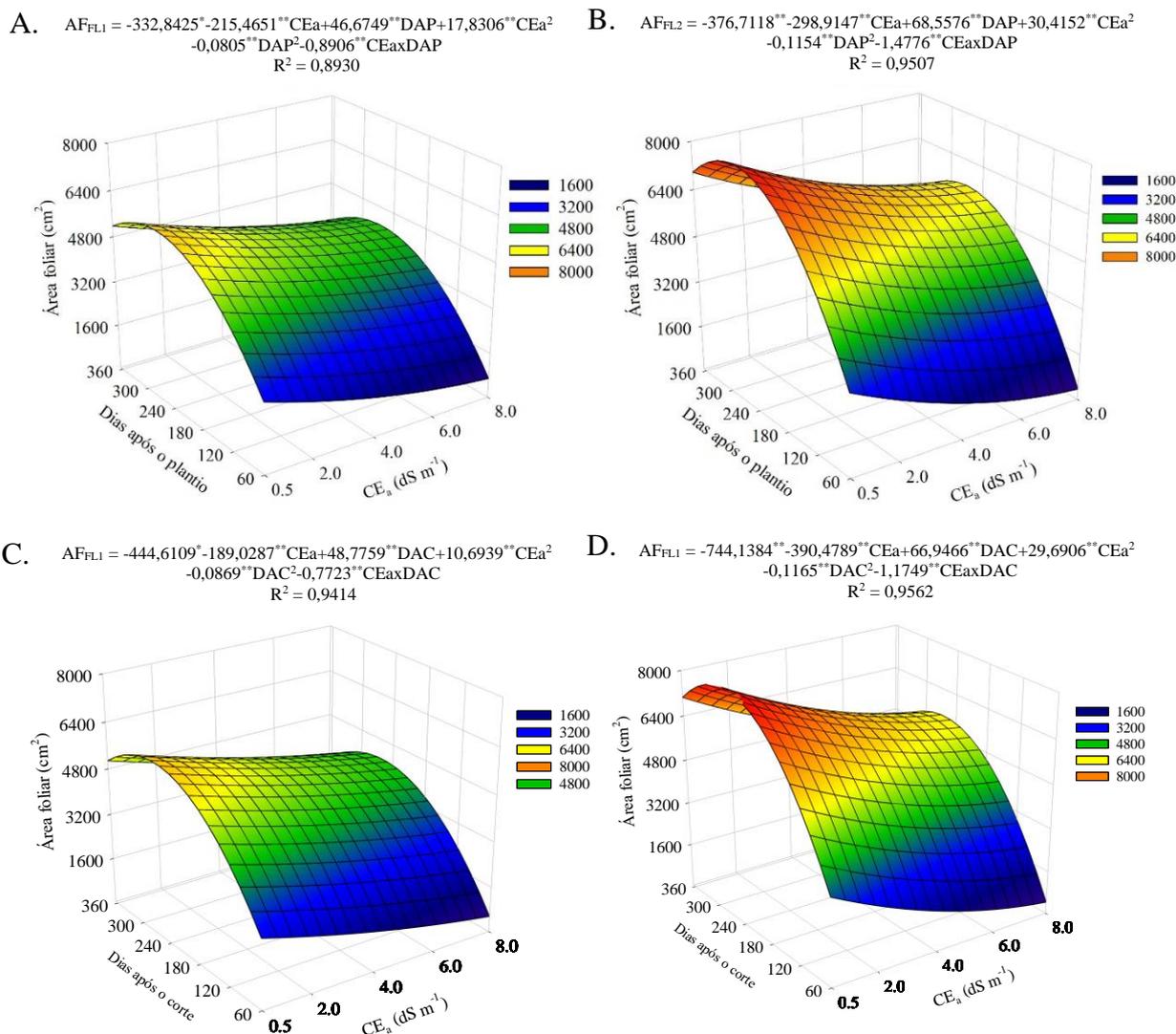
$$R^2 = 0,8190$$



******, ***** - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e, **ns** - não significativo pelo teste F.

Figura 4. Superfície de resposta do número de plantas (NP) da cana-de-açúcar submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com fração de lixiviação (FL2) para cana-planta (A e B) e cana-soca (C e D), respectivamente.

Nas Figuras 5A e B, pode-se observar as superfícies de respostas da área foliar (AF) na cana-planta em função dos níveis de salinidade da água de irrigação e dias após o plantio para as condições FL1 e FL2, respectivamente. Houve decréscimos de 215,465 e 298,915 cm² de AF para cada incremento unitário da salinidade da água de irrigação, para as condições FL1 (Figura 5A) e FL2 (Figura 5B). A salinidade promoveu reduções médias na área foliar das plantas de 35,3 e 37,0% para FL1 e FL2, respectivamente.



** , * - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e, ^{ns} - não significativo pelo teste F.

Figura 5. Superfície de resposta da área foliar (AF) da cana-de-açúcar submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com fração de lixiviação (FL2) para cana-planta (A e B) e cana-soca (C e D), respectivamente.

A máxima AF foi de 5944,94 e 7998,91 cm^2 ($CEa = 0,5 \text{ dS m}^{-1}$) obtida aos 270 DAP para as frações de lixiviação de 0 e 0,17, respectivamente, um aumento de 34,5% quando adotou-se a FL de 0,17. Para o nível de salinidade de 8,0 dS m^{-1} a AF foi de 4139,67 e 5496,16 cm^2 para as frações de lixiviação de 0 e 0,17, respectivamente.

Na cana-soca (Figuras 5C e D), pode-se observar que a salinidade promoveu reduções médias na AF das plantas de 36,86 e 39,9% para FL1 e FL2, respectivamente. A maior AF foi ocorreu aos 270 DAC na $CEa = 0,5 \text{ dS m}^{-1}$ sendo 5993,3 e 8186,6 cm^2 (+36,6%), nas condições FL1 e FL2, respectivamente. Na salinidade de 8,0 dS m^{-1} , a AF para as condições de lixiviação FL1 e FL2 foi de 4107,5 e de 5401,5 cm^2 (+31,5%), respectivamente.

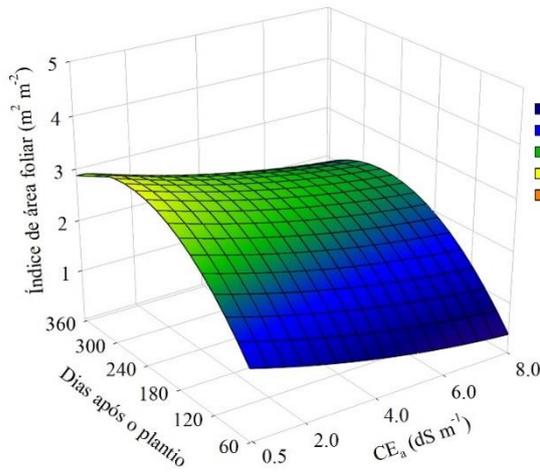
Em trabalho com os genótipos de cana PR692176 e V78-1 submetidos à irrigação com águas salobras (NaCl), García & Medina (2010), constataram diminuição na emissão foliar e aumento de folhas secas. Em plantas com deficiência hídrica ou sob condições de estresse salino a senescência foliar é atribuída à estratégia para diminuir a superfície transpirante e o gasto metabólico para a manutenção dos tecidos e/ou mecanismos de adaptação das plantas, livrando tecidos/órgãos novos em formação da acumulação de íons tóxicos (TAIZ et al., 2017).

Para o índice da área foliar (IAF) na cana-planta, observa-se um decréscimo de 0,1191 e 0,1658 m² m⁻² no índice da área foliar para cada incremento unitário da CEa, para FL1 (Figura 6A) e FL2 (Figura 6B). O maior IAF foi obtido aos 270 DAP na CEa = 0,5 dS m⁻¹, sendo de 3,31 e 4,44 m² m⁻² nas condições FL1 e FL2, respectivamente, aumento percentual de 34,5%. Na salinidade de 8,0 dS m⁻¹ os valores médios de IAF foram 2,30 e 3,05 m² m⁻² (+32,7%), para FL1 e FL2, respectivamente.

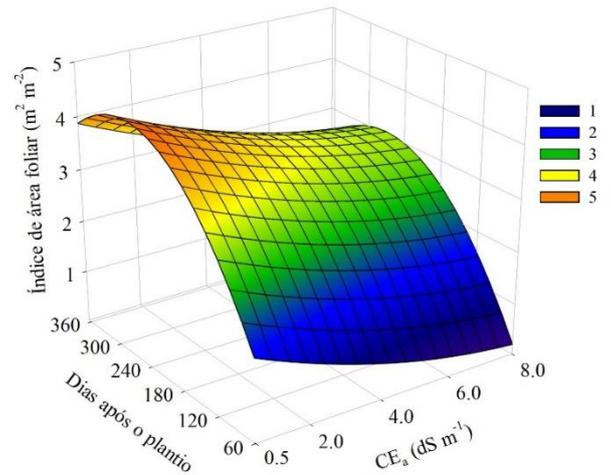
Na cana-soca (Figura 6C e D) o maior IAF foi obtido aos 270 DAC na CEa = 0,5 dS m⁻¹, sendo de 3,33 e 4,55 m² m⁻² nas condições FL1 e FL2, respectivamente, aumento percentual de 36,5%. Na salinidade de 8,0 dS m⁻¹ os valores médios de IAF para as condições FL1 e FL2 foram 2,28 e 3,01 m² m⁻² (+31,5%), respectivamente.

De acordo com Taiz et al. (2017), maiores valores de IAF garantem as plantas maior capacidade de acúmulo de fotoassimilados e aproveitamento da energia solar, e, conseqüentemente, maiores produtividades.

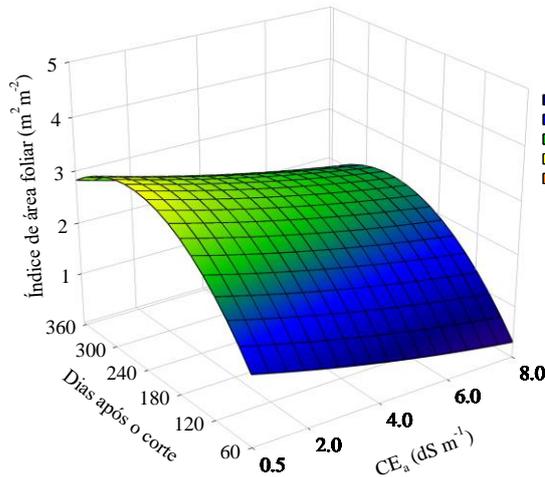
A. $IAF_{FL1} = -0,1861^* - 0,1191^{**}CEa + 0,0259^{**}DAP + 0,0098^{**}CEa^2 - 0,000044^{**}DAP^2 - 0,000049^{**}CEa \times DAP$
 $R^2 = 0,8930$



B. $AF_{FL2} = -0,7655^* - 0,1658^{**}CEa + 0,0380^{**}DAP + 0,0168^{**}CEa^2 - 0,000064^{**}DAP^2 - 0,00082^{**}CEa \times DAP$
 $R^2 = 0,9507$



C. $IAF_{FL1} = -0,2468^{**} - 0,1050^{**}CEa + 0,0271^{**}DAC + 0,0059^{**}CEa^2 - 0,00004^{**}DAC^2 - 0,0004^{**}CEa \times DAC$
 $R^2 = 0,9416$



D. $IAF_{FL2} = -0,4126^{**} - 0,2169^{**}CEa + 0,0371^{**}DAC + 0,0164^{**}CEa^2 - 0,00006^{**}DAC^2 - 0,0006^{**}CEa \times DAC$
 $R^2 = 0,9562$

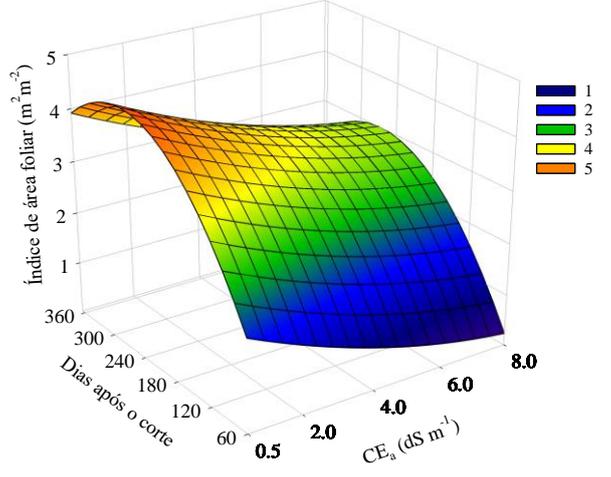
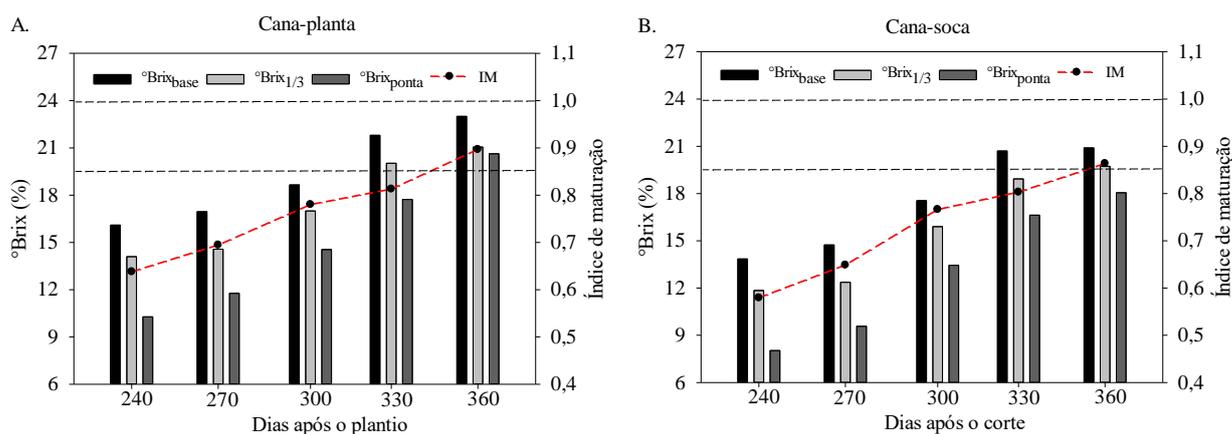


Figura 6. Superfície de resposta do índice de área foliar (IAF) da cana-de-açúcar submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com fração de lixiviação (FL2) para cana-planta (A e B) e cana-soca (C e D), respectivamente.

3.2. Qualidade tecnológica e produtividade

Na Figura 7, pode-se observar a evolução do teor de sólidos solúveis ($^{\circ}\text{Brix}$) e índice de maturação (IM) na cana-planta (Figura 7A) e soca (Figura 7B) a partir dos 240 dias após o plantio (DAP) e corte (DAC), respectivamente. O aumento do $^{\circ}\text{Brix}$ deve-se ao processo de maturação da cana-de-açúcar, associada à sua própria fisiologia e fatores climáticos como redução da precipitação pluvial local e suspensão da irrigação.



---- Valores considerados adequados segundo Consecana (2015): $0,85 < \text{IM} < 1,00$, cana pronta para ser cortada.

Figura 7. Teor de sólidos solúveis no caldo ($^{\circ}\text{Brix}$) e índice de maturação (IM) na cana-planta (A) e soca (B), correspondentes ao tratamento irrigado com água de abastecimento ($\text{CEa} = 0,5 \text{ dS m}^{-1}$) e sob a condição sem fração de lixiviação (FL1).

O IM (Figura 7A e B), indicou no mês de julho aos 240 DAP e DAC, para cana-planta e soca, respectivamente, valores médios de 0,63 e 0,60, respectivamente, indicando que a cana-de-açúcar havia iniciado o processo de maturação ($0,60 < \text{IM} < 0,85$). Na última avaliação realizada aos 360 DAP e DAC, os valores médios foram de 0,89 e 0,86, para cana-planta e soca, respectivamente, ou seja, cana-de-açúcar madura e pronta para ser cortada. De acordo com a CONSECANA (2015), valores de IM superiores a 1,00 indicam que a cultura encontra-se em declínio de maturação, assim, o seu acompanhamento torna-se indispensável para evitar perdas de rendimento industrial.

Na Tabela 3, observa-se que houve efeito significativo ($p \leq 0,05$) da interação entre os níveis de salinidade da água de irrigação ($\text{CEa} = 0,5; 2,0; 4,0; 6,0$ e $8,0 \text{ dS m}^{-1}$) e as condições sem (FL1) e com fração lixiviação (FL2) nos parâmetros tecnológicos (exceto para pureza do caldo, açúcares redutores totais do caldo, teor de fibras na cana-planta; teor de fibras na cana-soca).

Tabela 3. Resumo da análise de variância para teor de sólidos solúveis no caldo ($^{\circ}$ Brix), teor de sacarose no caldo (Pol_{caldo}), teor de sacarose na cana (Pol_{cana}), pureza do caldo (PZA), açúcares redutores totais do caldo (AR_{caldo}), teor de fibras (F), açúcares totais recuperáveis (ATR), produtividade de colmos (TCH), rendimento bruto de açúcar (RBAÇ), rendimento bruto de etanol (RBET) em cana-planta e soca sob níveis de salinidade da água de irrigação e condições de lixiviação

Cana-planta											
Quadrado médio											
Fonte de variação	GL	$^{\circ}$ Brix	Pol_{caldo}	Pol_{cana}	PZA	AR_{caldo}	F	ATR	TCH	RBAÇ	RBET
Fração (FL)	1	106,60**	90,57**	73,33**	2,37 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,94 ^{ns}	7399,48**	11587,89**	1015,96**	482,8**
Salinidade (CEa)	4	11,11**	7,16**	6,86**	4,08 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,10 ^{ns}	850,72**	33,1643**	190,67**	89,06**
FL x CEa	4	1,62**	2,41**	2,34**	6,93 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,20 ^{ns}	150,31**	261,67**	13,66**	6,88**
Resíduo	30	0,126	0,062	0,252	2,353	0,000	0,717	2,637	28,801	1,328	0,654
CV	%	1,72	1,36	3,04	1,73	3,47	7,05	5,48	3,98	4,56	4,56
Cana-soca											
Quadrado médio											
Fonte de variação	GL	$^{\circ}$ Brix	Pol_{caldo}	Pol_{cana}	PZA	AR_{caldo}	F	ATR	TCH	RBAÇ	RBET
Fração (FL)	1	26,16**	46,91**	33,65**	187,01*	0,03*	1,03 ^{ns}	2763,57**	11173,97**	775,10**	377,36**
Salinidade (CEa)	4	11,16**	28,15**	20,56**	178,65*	0,55*	2,35 ^{ns}	2039,12**	8006,16**	550,31**	246,07**
FL x CEa	4	0,52**	0,26**	2,11**	5,66*	0,00*	0,16 ^{ns}	203,71**	318,64**	2,93**	1,86**
Resíduo	30	0,028	0,024	0,010	0,597	0,000	0,645	3,124	8,972	0,256	0,131
CV	%	1,49	0,98	0,72	1,86	2,16	8,28	2,46	4,56	3,25	2,47

** , * - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e ^{ns} - não significativo, pelo teste F. GL - Grau de liberdade; CV - Coeficiente de variação.

Os valores do coeficiente de variação para todas as variáveis analisadas foram menores que 10%, classificado por Gomes (2009) como baixo.

Para cana-planta, o valor médio obtido da pureza do caldo foi de 88,50%, valor acima do mínimo indicado por Ripoli & Ripoli (2004) que recomendam que a pureza seja superior a 85%. O CONSECANA (2015) relata, em suas normas operacionais de determinação da qualidade da cana-de-açúcar, que a unidade industrial só poderá recusar o recebimento de carregamentos com pureza do caldo abaixo de 75%, assim, os achados nesta pesquisa encontram-se dentro dos padrões.

Valores de pureza do caldo acima de 85% foram obtidos por Oliveira et al. (2016) em experimento desenvolvido em Petrolina - PE, com sete variedades de cana-de-açúcar, incluindo a RB92579, independentemente das lâminas de irrigação (40; 60; 80 e 120% da ETc) avaliadas. Em estudos realizados com salinidade, Golabi et al. (2009) avaliando a resposta da qualidade do caldo de três variedades de cana-de-açúcar (CP48-103, CP57-614 e IRC99-01) submetidas a quatro níveis de condutividades elétricas da água de irrigação (2,0; 3,0; 4,5 e 6,0 dS m⁻¹) em região semiárida do Irã, observaram efeito da salinidade sobre a pureza do caldo, constatando valores de 89,7 e 83,5%, nos níveis de 2,0 e 6,0 dS m⁻¹, respectivamente, e redução percentual de 6,9%.

Para o mesmo ciclo de cultivo (cana-planta) o valor médio dos açúcares redutores do caldo (AR) foi de 0,61%, estando este dentro das recomendações de Ripoli & Ripoli (2004) e CONSECANA (2015) que estabelecem que o AR_{caldo} não deve ser superior a 0,80%. De acordo com Oliveira et al. (2016) trata-se de um parâmetro da qualidade tecnológica relevante, pois se refere à quantidade de glicose e de frutose presentes na cana e que está diretamente relacionado a sua pureza, onde seu aumento se reflete em menor eficiência na recuperação da sacarose pela fábrica.

Os teores de fibras para os ciclos de cana-planta e soca apresentaram valores médios de 12,01 e 11,78%, respectivamente, estando dentro do recomendado (11 a 13%) pelo CONSECANA (2015). De acordo com Oliveira et al. (2016) o teor de fibra do colmo é uma característica que sofre pouca influência das condições abióticas, como no caso de estresse hídrico ou salino, estando mais relacionada às características genéticas de cada variedade. Ainda de acordo com os autores elevados teores de fibra, aumentam a resistência à extração do caldo pela indústria e baixos teores reduzem a resistência da cultura ao tombamento.

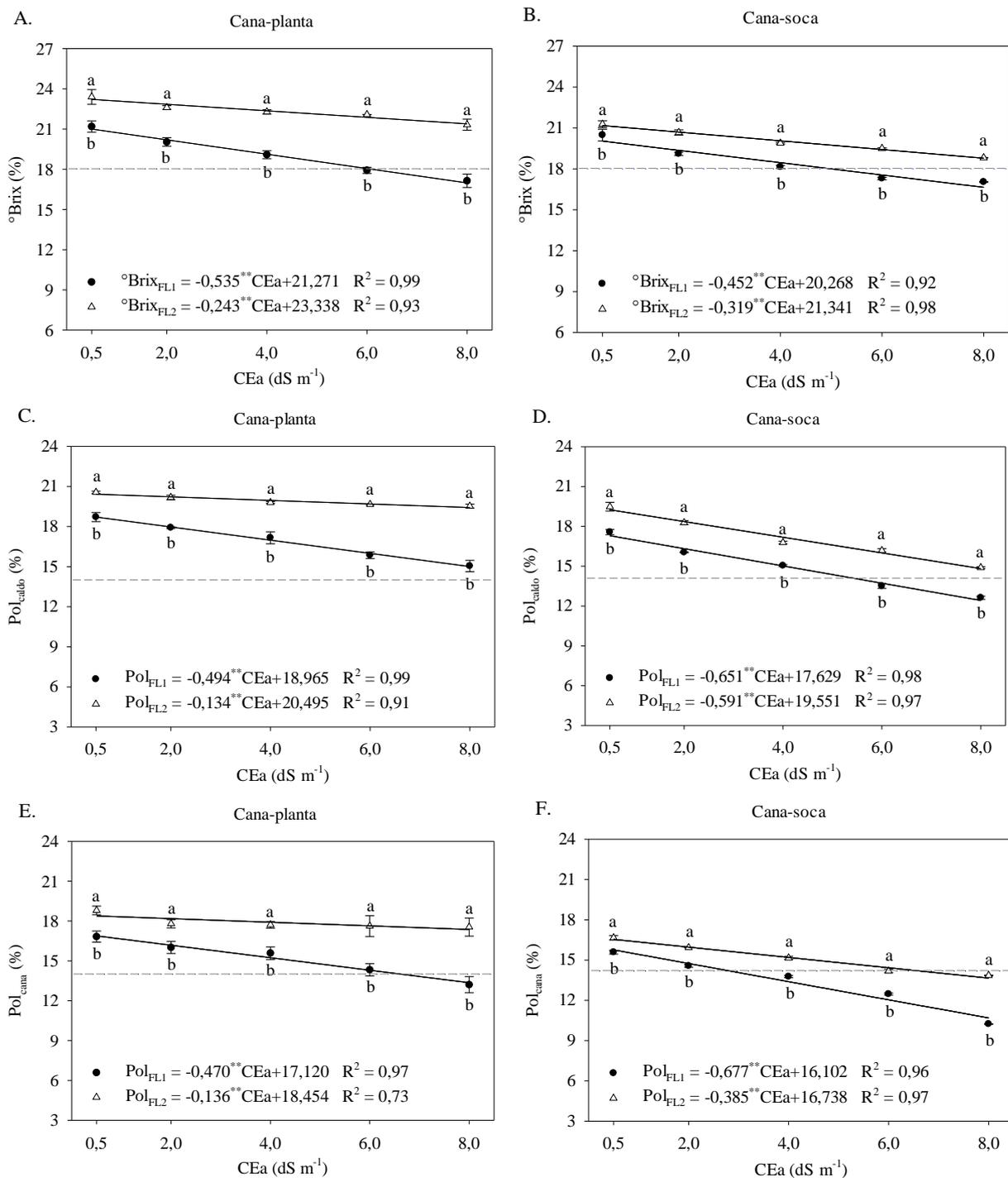
Foram observadas reduções lineares ($p \leq 0,05$) dos parâmetros tecnológicos analisados (exceto AR, cana-soca) em função do aumento dos níveis de salinidade da água de irrigação para ambas as condições de lixiviação (FL1 e FL2).

Para o teor de sólidos solúveis do caldo ($^{\circ}$ Brix) na cana-planta (Figura 8A), houve decréscimos de 0,535 e 0,243% de $^{\circ}$ Brix para cada incremento unitário de salinidade da água de irrigação para as condições sem (FL1) e com fração de lixiviação (FL2), respectivamente. Na condição FL1, os valores médios estimados pela equação de regressão foram de 21,0 e 16,99% para as condutividades de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente, redução de 19,1%. Para essa condição, os valores de $^{\circ}$ Brix a partir do nível de salinidade de 6,12 dS m⁻¹ encontram-se abaixo do recomendado pelo CONSECAN (2015) o qual diz que deve ser superior a 18%, representado pela reta tracejada na Figura. Para a condição FL2, os valores médios foram de 23,22 e 21,39% (-7,85%), para as respectivas salinidades (0,5 e 8,0 dS m⁻¹), encontrando-se dentro do recomendado pelo CONSECAN (2015).

De modo geral, a cana-soca (Figura 8B) apresentou menores valores de $^{\circ}$ Brix quando comparada a cana-planta (Figura 8A). Foram observadas reduções semelhantes para as FL1 (-16,91%) e FL2 (-11,30%) na salinidade de 8,0 dS m⁻¹ quando comparada as plantas irrigadas com água de abastecimento (0,5 dS m⁻¹) e os valores de $^{\circ}$ Brix encontram-se abaixo do mínimo recomendado pelo CONSECAN (2015) para a FL1 a partir do nível de CEa de 5,02 dS m⁻¹ e acima do recomendado para FL2 para todos os níveis de salinidade da água de irrigação.

Golabi et al. (2009) obtiveram valores médios de $^{\circ}$ Brix de 20,9 e 17,4% (-16,9%) para as condutividades elétricas da água de irrigação 2,0 e 6,0 dS m⁻¹, respectivamente, em região semiárida do Irã. Thomas et al. (1981) observaram que a irrigação salina a água não diminuiu consistentemente $^{\circ}$ Brix, Pol e a pureza do caldo, sendo estes resultados atribuídos à lixiviação dos sais da zona das raízes devido a elevadas lâminas de precipitação pluvial antes da colheita.

Os resultados obtidos no presente estudo, evidenciam a importância da fração de lixiviação associada a um eficiente sistema de drenagem em mitigar os efeitos do excesso de sais no solo, promovido pelo seu deslocamento para áreas mais profundas que da zona radicular (PUGA et al., 2016; ZHANG et al., 2019). Em média, as plantas dos tratamentos que receberam a fração de lixiviação apresentaram incremento de 17,11 e 8,79% no $^{\circ}$ Brix em relação aos tratamentos sem lixiviação, para cana-planta e soca, respectivamente.



** , * - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. Valores com letras diferentes indicam diferença significativa ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey nas condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.

---- Valores considerados adequados segundo Consecana (2015): $^{\circ}\text{Brix} > 18\%$ e $\text{Pol} > 14\%$.

Figura 8. Teor de sólidos solúveis no caldo ($^{\circ}\text{Brix}$) (A e B), teor de sacarose no caldo ($\text{Pol}_{\text{caldo}}$) (C e D) e teor de sacarose na cana (Pol_{cana}) (E e F) na cana-planta e soca, respectivamente, submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.

A salinidade da água de irrigação promoveu decréscimos unitários de 0,494 e 0,134% nos teores de sacarose no caldo (Pol_{caldo}) na cana-planta (Figura 8C) para as condições FL1 e FL2, respectivamente. Na condição FL1, os valores médios estimados para Pol_{caldo} foram 18,72 e 15,01% para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente, redução percentual de 19,79% e na FL2 os teores médios foram de 20,42 e 19,42 % (-4,92%). Para ambas condições de lixiviação e em todos os níveis de salinidade da água de irrigação, os valores médios encontram-se acima do mínimo recomendado pelo CONSECAN (2015).

Na cana-soca (Figura 8D), observa-se que cada incremento unitário de salinidade da água de irrigação promoveu reduções de Pol_{caldo} de 0,651 e 0,591% para as condições FL1 e FL2, respectivamente. Foram observadas reduções de 28,22 e 23,02% nos teores de sacarose, para as condições FL1 e FL2, respectivamente, nos tratamentos irrigados com salinidade de 8,0 dS m⁻¹ quando comparado as plantas irrigadas com água de abastecimento (0,5 dS m⁻¹). Os teores médios encontraram-se acima do limite mínimo (CONSECAN, 2015) até as salinidades de 5,57 dS m⁻¹ na condição FL1; na FL2 os teores de Pol para todos os níveis de salinidade se mantiveram acima do limite mínimo de teor de Pol que é 14%.

Na cana-planta (Figura 8E), houve redução de 0,470 e 0,136% nos teores de sacarose na cana (Pol_{cana}) para cada aumento unitário de salinidade para as condições FL1 e FL2, respectivamente. Na condição FL1, os valores médios de Pol_{cana} variaram de 16,89 e 13,36% para os níveis de salinidade de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente, uma redução de 20,89%, para FL2 os teores foram de 18,39 e 17,37% (-5,55%). No presente estudo, os valores de Pol_{cana} ficaram abaixo do recomendado pelo CONSECA (2015) apenas na condição sem lixiviação (FL1) nos níveis de salinidade da água de irrigação maiores que 6,64 dS m⁻¹.

Na Figura 8F, pode-se observar reduções mais significativas nos valores de Pol_{cana} na cana-soca quando comparada a cana-planta. Cada incremento unitário na salinidade da água de irrigação promoveu reduções de 0,677 e 0,385% nos teores de sacarose na cana para as condições FL1 e FL2, respectivamente. Nas condições FL1 e FL2, foram constatadas reduções percentuais de 32,21 e 17,45%, respectivamente, no nível de salinidade de 8,0 dS m⁻¹ quando comparada as plantas irrigadas com água de abastecimento (0,5 dS m⁻¹). Na cana-soca, os valores de Pol_{cana} ficaram abaixo do recomendado pelo CONSECA (2015) quando as plantas foram irrigadas com águas de

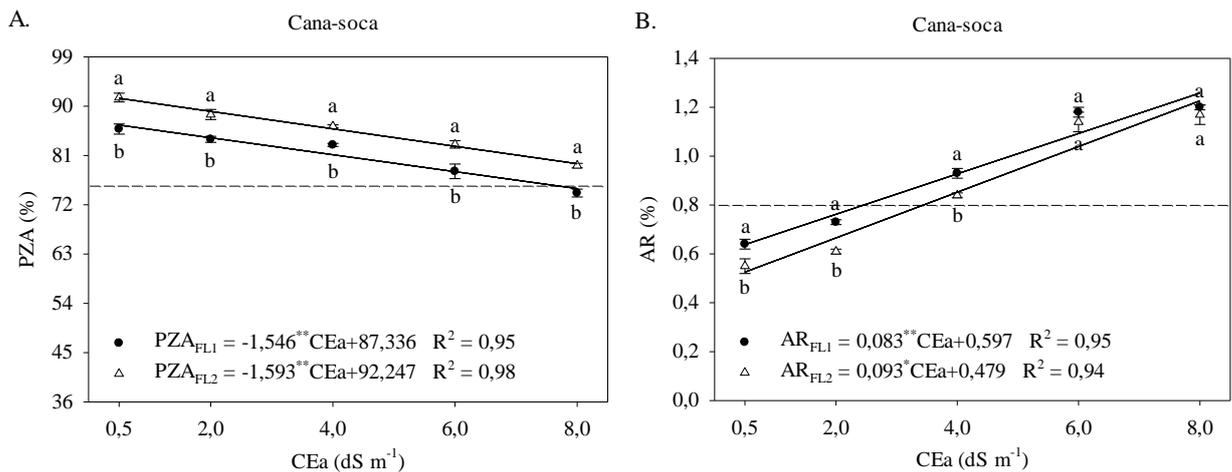
salinidade superiores a 3,10 e 7,11 dS m⁻¹, para as condições sem e com fração de lixiviação, respectivamente.

Golabi et. (2009) também observaram redução do Pol com o aumento da salinidade da água com valores de 18,4 e 16,1% (-12,5%) para os respectivos níveis de 2,0 e 6,0 dS m⁻¹.

Na cana-soca, pode-se observar que a pureza do caldo (PZA) e os açúcares redutores totais do caldo (AR), Figura 9, foram afetados pelos níveis de salinidade da água de irrigação e condições de lixiviação. Para a PZA, houve decréscimos de 1,546 e 1,593% para cada incremento unitário de salinidade para as FL1 e FL2, respectivamente. Na condição FL1, foram observados valores médios de PZA de 86,56 e 74,97% (-13,39%) e na FL2 de 91,45 e 79,50 (-13,06%) para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente. No presente estudo, os valores de PZA ficaram abaixo do recomendado pelo CONSECA (2015) que é de 75% apenas na condição sem lixiviação nos níveis de salinidade da água de irrigação maiores que 7,98 dS m⁻¹. Abaixo do limite de PZA de 75%, a unidade industrial poderá recusar o recebimento de carregamentos de acordo com o CONSECANA (2015).

Para AR (Figura 9B), houve incremento de 0,083 e 0,093% para cada aumento unitário de salinidade para as condições FL1 e FL2, respectivamente. Na condição FL1, os valores médios de AR foram 0,64 e 1,26% para os níveis de salinidade de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente, um aumento expressivo de 97,49%, para FL2 os teores foram de 0,53 e 1,22% (+132,73%).

Ashraf et al. (2009) avaliaram as variedades SPF 213 e HSF 240, classificadas como sensível e tolerante a salinidade, respectivamente, em solos salino sódico (CEe = 10,9 dS m⁻¹) do Paquistão e observaram valores de °Brix e Pol de 33 e 36%, respectivamente, mais elevados na variedade tolerante (HSF 240) quando comparados a sensível aos sais. Ainda de acordo com os autores, a retenção de Na⁺ nos tecidos foliares das plantas reduziu a atividade da sacarose sintase e fosforilase do amido e aprimorou a atividade das invertases ácidas e neutras causando a quebra da sacarose em açúcares redutores (glicose e frutose), aumentando assim, os teores desses açúcares no caldo.



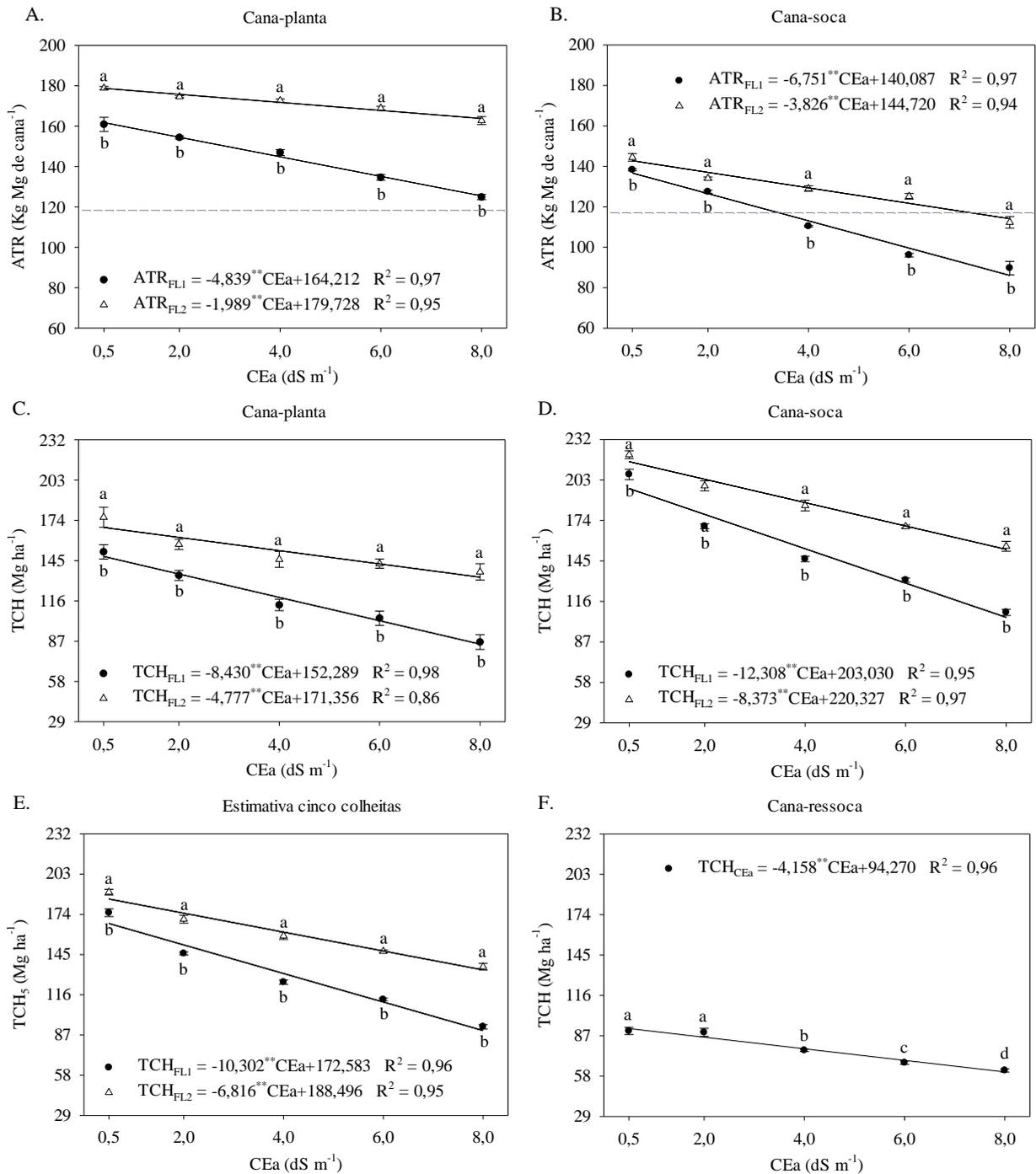
^{**}, ^{*} - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. Valores com letras diferentes indicam diferença significativa ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey nas condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.

---- Valores considerados adequados segundo Consecana (2015): PZA > 75% e AR_{caldo} < 0,80%.

Figura 9. Pureza do caldo (PZA) (A) e açúcares redutores totais do caldo (AR_{caldo}) (B) na cana-soca submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.

A salinidade da água de irrigação promoveu reduções unitárias de 4,839 e 1,989 Kg Mg de cana⁻¹ para os açúcares totais recuperáveis (ATR) (Figura 10A), nas condições sem e com fração de lixiviação, respectivamente, para a cana-planta. Na condição FL1, os valores médios de ATR (ie., sacarose, glicose e frutose) variaram de 161,79 e 125,50 Kg Mg de cana⁻¹ para os níveis de salinidade de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente, uma redução de 22,43%. Para FL2 os valores médios foram 178,7 e 163,8 Kg Mg de cana⁻¹, para as salinidades 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente, redução percentual de 8,35%. Para as duas condições de lixiviação (FL1 e FL2) e todos níveis de salinidade (0,5; 2,0; 4,0; 6,0 e 8,0 dS m⁻¹) os rendimentos de açúcares recuperáveis foram acima do valor base considerado adequado para a cana-padrão que é de 119,0063 Kg Mg de cana⁻¹ de acordo com o CONSECANA (2015).

Na cana-soca (Figura 10B), houve reduções nos ATR de 6,751 e 3,826 Kg Mg de cana⁻¹ para cada incremento unitário da salinidade da água de irrigação para as FL1 e FL2, respectivamente. Na condição FL1, os valores médios de ATR foram 136,71 e 86,08 Kg Mg de cana⁻¹ para os níveis de salinidade de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente, uma redução de 37,04%, para FL2 foram de 142,81 e 114,11 Kg Mg de cana⁻¹, redução de 20,09%.



******, ***** - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. Valores com letras diferentes indicam diferença significativa ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey nas condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.

----- Valor considerado adequado para cana padrão segundo Consecana (2015): ATR = 119,0063 Kg Mg de cana.

Figura 10. Açúcares totais recuperáveis (ATR) (A e B) e produtividade de colmos (TCH) (C e D) na cana-planta e soca, respectivamente, estimativa de produtividade média de cinco cortes (TCH₅) (E) submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação; produtividade de colmos (TCH) (F) da ressoca sob regime de sequeiro.

Na cana-soca, os valores de ATR ficaram abaixo do recomendado pelo CONSECA (2015) quando as plantas foram irrigadas com águas de salinidade superiores a 3,12 e 6,72 dS m⁻¹, para as condições sem e com fração de lixiviação, respectivamente.

De modo geral, a cana-planta apresentou maiores valores dos parâmetros tecnológicos avaliados (exceto AR). Apesar do primeiro ciclo de cultivo ter ocorrido menores lâminas de precipitação pluvial, houve uma melhor distribuição temporal, melhorando a qualidade da cana, além disso, na cana-soca houve uma maior duração de exposição às plantas ao estresse salino.

Segundo Anitha et al. (2015) as respostas das plantas ao estresse salino são complexas, ocorrendo em redes genéticas e processos metabólicos que dependem da tolerância ao sal inerente da espécie vegetal, concentração de sal e duração da exposição.

Para Produtividade de colmos (TCH) (Figura 10C) na cana-planta, o aumento unitário dos níveis salinos promoveu decréscimos de 8,430 e 4,777 Mg ha⁻¹ para as condições sem e com fração de lixiviação, respectivamente. O maior rendimento de massa verde de colmos foi obtido quando se adotou a FL2 na salinidade de 0,5 dS m⁻¹ (168,9 Mg ha⁻¹), enquanto que, no nível salino de 8,0 dS m⁻¹ para esta mesma condição a TCH foi de 133,1 Mg ha⁻¹ (-21,19%). Na condição FL1, os valores obtidos de TCH foram de 148,1 e 84,9 Mg ha⁻¹, para os respectivos níveis de salinidade da água de irrigação, redução de -42,67%.

De acordo com a classificação proposta por Maas & Hoffmam (1977), a cana-de-açúcar apresenta salinidade limiar de 1,7 dS m⁻¹, sendo classificada como moderadamente sensível a salinidade. No entanto, com base na queda de rendimento em massa seca dos colmos, na condição com lixiviação (FL2) a variedade RB92579 foi classificada como moderadamente tolerante, de acordo com a classificação de Fageria (1985), pois a redução da produção encontra-se dentro da faixa de 21-40%, e, sem lixiviação (FL1) como moderadamente sensível (redução de 41-60%) até a salinidade da água de irrigação de 8,0 dS m⁻¹.

Na cana-soca (Figura 10D), houve decréscimos de 12,308 e 8,373 Mg ha⁻¹ para cada incremento unitário de salinidade para as FL1 e FL2, respectivamente. Na condição FL1, foram observados valores médios de TCH de 196,88 e 104,57 Mg ha⁻¹ (-46,89%) e na FL2 foram 216,14 e 153,34 (-29,05%) para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente. Para as condições FL1 e FL2, a classificação quanto a tolerância a

salinidade foi a mesma observada para cana-planta.

Pode-se destacar que o manejo da salinidade da água de irrigação por meio do uso da fração de lixiviação influenciou de maneira positiva a tolerância da cana-de-açúcar (RB92579) minorando os efeitos do estresse salino. Em média, as plantas dos tratamentos que receberam a fração de lixiviação apresentaram incremento de 28,92 e 21,91% na TCH em relação aos tratamentos sem lixiviação, para cana-planta e soca, respectivamente.

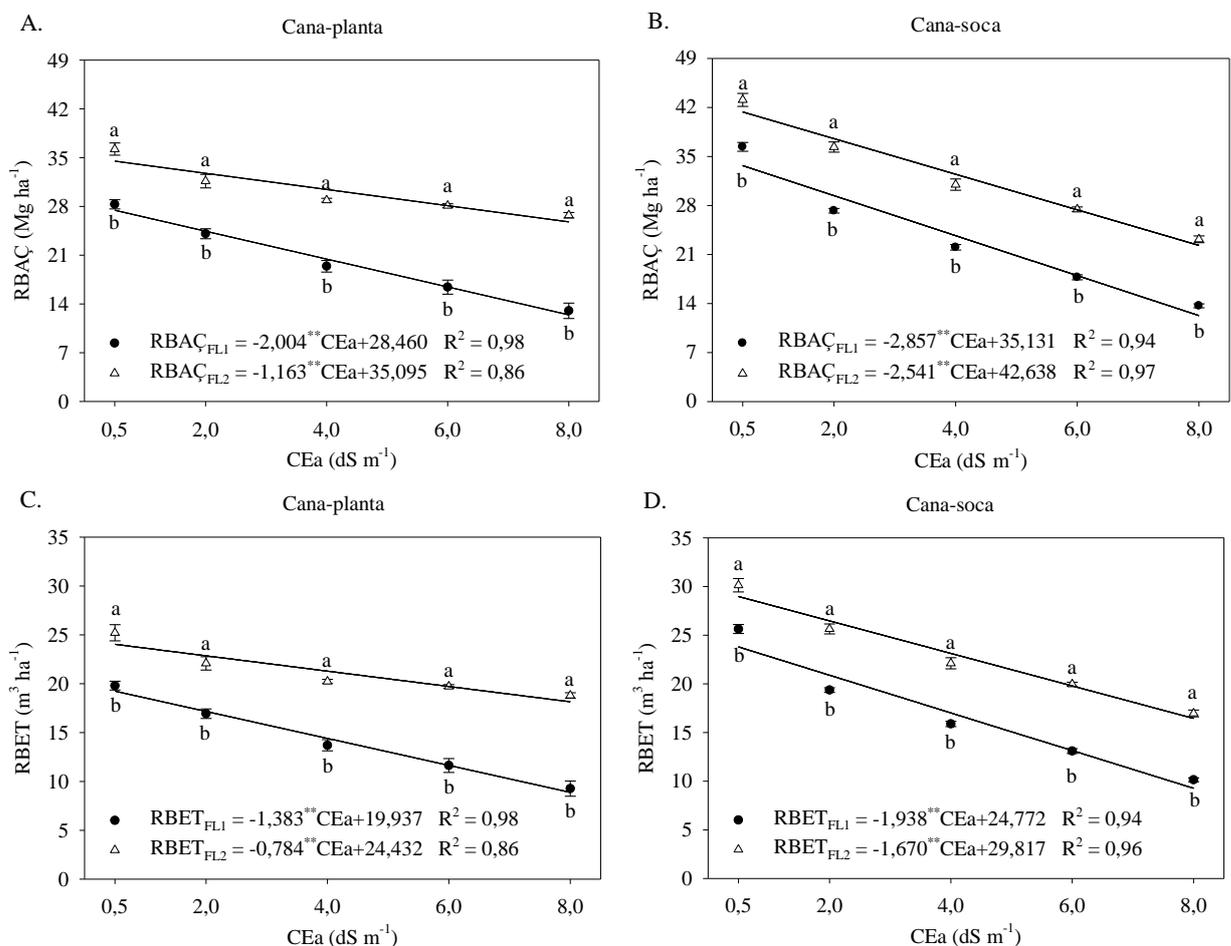
Segundo a RIDESA (2015), em área comercial de 60 ha plantada com a mesma variedade de cana-de-açúcar (RB92579) na Empresa Agroindústrias do Vale do São Francisco (Agrovale), na Bahia, sob irrigação plena, foi observada uma produtividade de 260 Mg ha⁻¹ em 13 meses, considerado um recorde mundial de máxima produtividade em área comercial. Cabe destacar, que esse alto índice de produtividade comercial na Agrovale foi alcançado em área onde se pratica tecnologia de precisão, notadamente no que se refere à utilização de sistemas de irrigação localizada e aplicação de nutrientes via fertirrigação.

Estudo realizado por Lira et al. (2018) em Recife, PE com a variedade RB867515 sob irrigação com águas salobras (0,5 a 6,5 dS m⁻¹) observaram uma redução de 28,64% no rendimento de massa verde, sendo o maior rendimento (116,60 Mg ha⁻¹) obtido no menor nível de salinidade. Os autores ainda destacaram que a variedade foi classificada como moderadamente sensível à salinidade.

Na Figura 10E, pode-se observar uma estimativa de produtividade média de colmos para os próximos cinco cortes (TCH₅). Para a condição FL1, foram observados valores médios de TCH₅ foram 167,43 e 90,17 Mg ha⁻¹ (-46,15%) e na FL2 foram 185,09 e 133,97 (-27,62%) para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente. A variável TCH₅ indica o potencial de longevidade do canavial, característica fundamental para a economicidade da cultura por representar maior intervalo de tempo entre o plantio e a renovação da área. De acordo com Silva et al. (2010), um canavial economicamente produtivo deve ser conduzido por no mínimo cinco a seis cortes ou até quando a produtividade média atingir ao redor de 65 Mg ha⁻¹. Portanto, no presente estudo, a cana-de-açúcar (RB92579) irrigada sob as condições sem (FL1) e com fração de lixiviação (FL2) e níveis de salinidade da água de irrigação (0,5; 2,0; 4,0; 6,0 e 8,0 dS m⁻¹) apresentou expectativa de produtividade acima do mínimo requerido para renovação da área.

Na Figura 10F, observa-se a produtividade de colmos da cana-ressoca. Apesar de ter sido conduzida sob sistema de sequeiro, pôde-se observar efeito residual dos níveis de salinidade da água de irrigação, sendo observadas diferenças significativas ($p \leq 0,05$) entre as plantas que haviam sido irrigadas com as salinidades 4,0; 6,0 e 8,0 dS m^{-1} , não sendo observada diferença significativa para os níveis de 0,5 e 2,0 dS m^{-1} , os quais apresentaram as maiores médias em relação aos demais. Apesar de ter sido conduzida em regime de sequeiro, a variedade RB97579 apresentou produtividade média 75,63 Mg ha^{-1} , estando acima da média do estado de Pernambuco na safra 2018/2019 que foi de 49,40 Mg ha^{-1} de acordo com a CONAB (2019).

A salinidade da água de irrigação promoveu reduções unitárias de 2,004 e 1,163 Mg ha^{-1} no rendimento bruto de açúcar (RBAÇ) (Figura 11A), nas condições FL1 e FL2, respectivamente, para cana-planta.



** , * - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. Valores com letras diferentes indicam diferença significativa ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey nas condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.

Figura 11. Rendimento bruto de açúcar (RBAÇ) (A e B) e rendimento bruto de etanol (RBET) (C e D) na cana-planta e soca, respectivamente, submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.

Na condição FL1, os valores médios foram 27,46 e 12,43 Mg ha⁻¹ para os níveis de salinidade de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente, uma redução de 54,74%, para FL2 os valores médios foram 34,51 e 25,79 Mg ha⁻¹ (-25,27%).

Na cana-soca (Figura 11B), houve reduções no RBAÇ de 2,857 e 2,541 Mg ha⁻¹ para cada incremento unitário da salinidade da água de irrigação para as FL1 e FL2, respectivamente. Na condição FL1, os valores médios de RBAÇ foram 33,70 e 12,28 Mg ha⁻¹ para os níveis de salinidade de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente, uma redução de 63,58%, para FL2 foram de 41,37 e 22,31 Mg ha⁻¹ (46,07%).

Em média as plantas dos tratamentos irrigados com uso da fração de lixiviação (FL2 = 0,17) apresentaram rendimento bruto de açúcar 49,81% (cana-planta) e 37,59% (cana-soca) maior do que àquelas irrigadas sem fração de lixiviação (FL1 = 0).

Estudo realizado por Silva et al. (2014b) com a mesma variedade (RB92579), sob irrigação plena por sulcos em área experimental da Usina Agrovale em Juazeiro, Bahia, observaram rendimento bruto de açúcar (RBAÇ) de 20,89 e 14,61 Mg ha⁻¹ para cana-soca e ressoça, respectivamente.

Para o rendimento bruto de etanol (RBET) (Figura 11C) na cana-planta, o aumento unitário dos níveis salinos promoveu decréscimos de 1,383 e 0,784 m³ ha⁻¹ para as condições FL1 e FL2, respectivamente. Para FL1, os valores médios de RBET foram 19,25 e 8,87 m³ ha⁻¹ para os níveis de salinidade de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente, uma redução de 53,90%, para FL2 foram de 24,04 e 18,16 m³ ha⁻¹ (-24,46%).

Na cana-soca (Figura 11D), o aumento unitário dos níveis salinos promoveu decréscimos de 1,938 e 1,670 m³ ha⁻¹ para as condições FL1 e FL2, respectivamente. Foram observados valores médios de RBET de 23,80 e 9,27 m³ ha⁻¹ (-61,06%) na FL1 e 28,98 e 16,46 m³ ha⁻¹ (-43,22%) na FL2 para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente. Apesar das significativas reduções significativas do RBET em função do aumento da salinidade da água de irrigação, em média as plantas irrigadas com a fração de lixiviação de 0,17 apresentaram rendimento bruto de açúcar 48,72 e 36,51% para cana-planta e soca, respectivamente, maior do que os tratamentos sem fração de lixiviação.

Silva et al. (2014b) encontraram rendimentos brutos de etanol de 15,01 e 10,44 m³ ha⁻¹ para cana-soca e ressoça (RB92579) sob irrigação plena em Juazeiro, Bahia.

4. CONCLUSÕES

O índice de maturação foi eficiente para acompanhar a maturação da cana-de-açúcar.

O incremento da salinidade da água de irrigação afetou negativamente todas as variáveis de crescimento da cana-de-açúcar: altura e diâmetro do colmo, número de plantas, área foliar e índice de área foliar.

A salinidade afetou de maneira negativa a qualidade industrial da cana-de-açúcar: °Brix, Pol, ATR, RBAÇ e RBET para ambos os ciclos de cultivo.

O incremento nos níveis de salinidade da água de irrigação promoveu reduções na PZA e aumento nos AR na cana-soca.

A fração de lixiviação de 0,17 mitigou os efeitos deletérios dos sais no crescimento e na qualidade industrial da cana-de-açúcar.

A produção de biomassa de colmos foi reduzida com o aumento da salinidade da água de irrigação, sendo este efeito atenuado pelo uso da fração de lixiviação (0,17).

A salinidade da água de irrigação dos ciclos de cana-planta e cana-soca promoveu efeito residual na produção de biomassa na cana-ressoca conduzida sob regime de sequeiro.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, P. S.; RAES, R.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p. 711-728, 2013.

ANITHA, R.; MARY, P. C. N.; SAVERY, M. A. J. R; SRITHARAN, N.; PURUSHOTHAMAN, R. S. Differential responses of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) genotypes under salt stress condition. **Plant Archive**, v.15, n.2, p.1055-1060, 2015.

ASHRAF, M.; RAHMATULLAH, AHMAD, R.; AFZAL, M.; TAHIR, M. A.; KANWAL, S.; MAQSOOD, M. A. Potassium and Silicon Improve yield and juice

quality in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) under salt stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.195, n.4, p.284-291, 2009.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **Qualidade da água na agricultura**. Campina Grande: UFPB, 1999. 153p. Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29.

BARROS, A. H. C. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica: Árvore do conhecimento: Território Mata Sul Pernambucana - Clima**. Disponível: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_mata_sul_pernambucana/arvore/C ONT000fbz2ztdp02wx5eo0sawqe3h6815n4.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_mata_sul_pernambucana/arvore/C%20ONT000fbz2ztdp02wx5eo0sawqe3h6815n4.html)>. Acesso em: 03/03/2019.

CALDAS, C. **Manual de análises selecionadas para indústrias sucroalcooleiras**. Maceió: Sindicato da Indústria e do Álcool do Estado de Alagoas, 1998. 438p.

CAVALCANTI, F. J. A.; SANTOS, J. C. P.; PEREIRA, J. R.; LEITE, J. P.; SILVA, M. C. L.; FREIRE, F. J.; SILVA, D. J.; SOUSA, A. R.; MESSIAS, A. S.; FARIA, C. M. B.; BURGOS, N.; LIMA JÚNIOR, M. A.; GOMES, R. V.; CAVALCANTI, A. C.; LIMA, J. F. W. F. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco**. 2.ed. Recife: Instituto Agrônomico de Pernambuco, 2008. 198p.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar**. v.6 - safra 2019/2020 - Terceiro levantamento. Brasília, 2019. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana> >. Acesso em: 26 ago. 2019.

CONSECANA - Conselho dos produtores de cana-de-açúcar, açúcar e álcool do Estado de São Paulo. **Manual de Instruções**. 6.ed. Piracicaba - SP, 2015. 80p.

DILLEWIJN, C. V. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chronica Botanica, 1952. 371p.

DOORENBOS, J. Y; PRUITT, W. O. **Crop water requirements**. FAO Estudio de Riego y Drenaje, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, n.24, 1977. 144p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. FAO. Estudos de Irrigação e Drenagem, 33.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2011. 212p.

FAGERIA, N. K. Salt tolerance of rice cultivars. **Plant and Soil**, v.88, n.3, p.237-243, 1985.

GALDIANO, L. C. **Qualidade da cana-de-açúcar submetida à aplicação de maturadores químicos em final de safra**. 53f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Produção Vegetal) - Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias Campus de Jaboticabal, Jaboticabal, 2008.

GARCÍA, M.; MEDINA, E. Crecimiento y morfología radical en dos genotipos de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) sometidos a salinización con sales simples o suplementadas con cálcio. **Revista de la Facultad de Agronomía**, v.27, n.1, p.17-38, 2010.

GOLABI, M.; NASERI, A. A.; KASHKULI, H. A. Mathematical modeling of the relationship between irrigation water salinity and sugarcane juice quality. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v.7, n.3 e 4, p.600-602, 2009.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 15.ed. Piracicaba: USP, 2009. 451p.

GUERZONI, J. T.; BELINTANI, N. G.; MOREIRA, R. M.; HOSHINO, A. A.; DOMINGUES, D. S.; FILHO, J. C.; VIEIRA, L. G. O gene $\Delta 1$ -pirrolina-5-carboxilato sintetase induzido por estresse (P5CS) confere tolerância ao estresse salino na cana transgênica. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.36, n.4, p.2309-2319, 2014.

HERMANN, E. R.; CÂMARA, G. M. S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. **Revista STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.17, n.2, p.32-34, 1999.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Normal Climatológica do Brasil 1981-2010**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. Acesso em: 03 mar. 2019.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Avibook, 1990. 649p.

LIRA, R. M.; SILVA, Ê. F. F.; SIMÕES NETO, D. E.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; LIMA, B. L. C.; SILVA, J. S. Growth and yield of sugarcane irrigated with brackish water and leaching fractions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.3, p.170-175, 2018.

MAAS, E. V. Crop tolerance. **California Agriculture**, v.36, n.1, p.20-21, 1984.

MAAS, E. V.; HOFFMAN, G. J. Crop salt tolerance: Current assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division ASCE*, v.103, n.4, p.115-134, 1977.

MANHÃES, C. M. C.; GARCIA, R. F.; FRANCELINO, F. M. A.; FRANCELINO, H. O.; COELHO, F. C. Fatores que afetam a brotação e o perfilhamento da cana-de-açúcar. **Vértices**, v.17, n.1, p.163-181, 2015.

MEDEIROS, J. F.; GHEYI, H. R.; COSTA, A. R. F.; TOMAZ, H. V. Q. Manejo do solo-água-plantas em áreas afetadas por sais. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; FILHO, E. G. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. 2.ed., Fortaleza, INCT Sal, 2016. Cap.20, p.319-335.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, v.59, n.1, p.651-681, 2008.

OLIVEIRA, A. R. DE; BRAGA, M. B.; SIMÕES, W. L.; WALKER, A. M. **Influência de lâminas de irrigação nas características tecnológicas de cana-de-açúcar**. Petrolina: Embrapa Semiárido (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n.127), 2016. 22p.

OLIVEIRA, F. M.; ASPIAZÚ, I.; KONDO, M. K.; BORGES, I. D.; PEGORARO, R. F.; VIANNA, E. J. Crescimento e produção de variedades de cana-de-açúcar influenciadas por diferentes adubações e estresse hídrico. **Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas**, v.5, n.1, p.56-64, 2011.

PUGA, A. P.; MELO, L. C. A.; ABREU, C. A.; COSCIONE, A. R.; PAZ-FERREIRO, J. Leaching and fractionation of heavy metals in mining soils amended with biochar. **Soil & Tillage Research**, v.164, n.1, p.25-33, 2016.

RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: USDA, 1954. 60 p. Handbook, 60.

RIDESA - Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro. **45 anos de variedades RB de cana-de-açúcar: 25 anos de Ridesa**. 1.ed. Curitiba: Graciosa, 2015. 156p.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Barros & Marques Editoração Eletrônica, Piracicaba, 2004. 302p.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353p.

SILVA, M. A.; ARANTES, M. T.; RHEIN, A. F. L.; GAVA, G. J. C.; KOLLN, O. T. Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.3, p.241-249, 2014b.

SILVA, M. A.; CATO, S. C.; COSTA, A. G. F. Produtividade e qualidade tecnológica da soqueira de cana-de-açúcar submetida à aplicação de biorregulador e fertilizantes líquidos. **Ciência Rural**, v.40, n.4, p.774-780, 2010.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; SOUZA, L. S. B. Biomassa seca acumulada, partições e rendimento industrial da cana-de-açúcar irrigada no Semiárido brasileiro. **Revista Ceres**, v.61, n.5, p.686-696, 2014a.

SIMÕES, W. L.; CALGARO, M.; COELHO, D. S.; SANTOS, D. B.; SOUZA, M. A. Growth of sugar cane varieties under salinity. **Revista Ceres**, v.63, n.2, p.265-271, 2016.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12.ed. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2014. 372p.

SOUTO FILHO, L. T. **Crescimento e produção de dois genótipos de cana-de-açúcar com suplementação de regas com águas salinizadas**. 70f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

STATSOFT. Inc. **STATISTICA: Data Analysis Software System, version 10.0.** 2010.

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

THOMAS, J. R.; SALINAS, F. G.; OERTHER, G. F. Use of saline water for supplemental irrigation of sugarcane. **Agronomy Journal**, v.73, n.1, p.1011-1017, 1981.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies on growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, v.11, n.1, p.41-76, 1947.

YASAR, A.; SHABBIR, S. A.; TABINDA, A. B.; NAZAR, M.; RASHEED, R.; MUKHTAR, A. M. S. Refusederived fuels as a renewable energy source in comparison to coal, rice husk, and sugarcane bagasse. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v.41, n.5, p.564-572, 2019.

ZHANG, C.; LIA, X.; KANGA, Y.; WANG, X. Salt leaching and response of *Dianthus chinensis* L. to saline water dripirrigation in two coastal saline soils. **Agricultural Water Management**, v.218, n.1, p.8-16, 2019.

CAPÍTULO III

**ESTADO NUTRICIONAL, EXTRAÇÃO E EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES E
PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA COM ÁGUAS
SALOBRAS E FRAÇÃO DE LIXIVIAÇÃO**

Estado nutricional, extração e exportação de nutrientes e produtividade da cana-de-açúcar irrigada com águas salobras e fração de lixiviação

RESUMO - A salinização do solo reduz o potencial osmótico da solução e o acúmulo excessivo de íons no solo interferem na absorção de nutrientes e, conseqüentemente diminuindo o rendimento das culturas. Assim, objetivou-se avaliar o estado nutricional, a extração e exportação de nutrientes e de sódio e a produtividade da cana-planta e cana-soca (RB92579) irrigadas com águas salobras e condições de lixiviação. O experimento foi conduzido na Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com esquema fatorial 5 x 2, sendo cinco níveis de salinidade da água de irrigação (CEa: 0,5; 2,0; 4,0; 6,0 e 8,0 dS m⁻¹) e as condições sem (FL1 = 0) e com fração de lixiviação (FL2 = 0,17), com quatro repetições. Para avaliação do estado nutricional foi realizada a coleta da folha diagnóstica (folha +3) aos quatro meses após a brotação (cana-planta) e quatro meses após o corte (cana-soca) visando-se a quantificação dos teores de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, cobre, ferro, manganês, zinco, cloreto e sódio. Aos 365 dias após o plantio (cana-planta) e corte (cana-soca) foi realizada a colheita, sendo as plantas divididas em colmos e ponteiros + folhas e pesadas visando-se a determinação da biomassa fresca e seca. Em seguida, as amostras das partes das plantas foram utilizadas para a quantificação dos acúmulos nutricionais e de sódio, por meio da multiplicação da matéria seca de cada uma das partes pelo teor de nutrientes. O aumento da salinidade da água de irrigação reduziu os teores foliares de N, P, K, Mg, S, Fe, Mn, Cu e Zn e aumentou os teores de Ca, Cl e Na para ambos os ciclos de cultivo. Com exceção do Ca, Cl e Na, a extração e exportação de nutrientes foram afetadas negativamente com o incremento da salinidade da água de irrigação na cana-planta e cana-soca. A ordem de extração e de exportação de nutrientes e de sódio pela variedade RB92579 foi: sem lixiviação (N > K > Ca > Mg > P > S > Fe > Mn > Cl > Na > Zn > Cu) e com fração de lixiviação (N > K > Mg > Ca > P > S > Fe > Mn > Cl > Na > Zn > Cu). A produção de biomassa foi afetada negativamente pelo aumento da salinidade da água de irrigação. A fração de lixiviação (0,17) reduziu os efeitos da salinidade nos teores nutricionais, na produtividade e promoveu maiores extrações e exportações de nutrientes pela cultura em ambos os ciclos de cultivo e menores de Ca, Cl e Na.

Palavras-chave: *Saccharum* spp., salinidade, nutrição mineral, rendimento de massa verde

Nutritional status, extraction and export of nutrients and sugarcane yield irrigated with brackish water and leaching fraction

ABSTRACT - The salinization of the soil reduces the osmotic potential of the solution and the excessive accumulation of ions in the soil interferes with the absorption of nutrients and, consequently, decreases the crop yield. Thus, the objective was to evaluate the nutritional status, the extraction, and export of nutrients and sodium and the productivity of cane-plant and ratoon (RB92579) irrigated with brackish water and leaching conditions. The experiment was conducted at the Federal Rural University of Pernambuco, Recife, PE. The design was completely randomized, a 5 x 2 factorial scheme, with five levels of irrigation water salinity (ECw: 0.5; 2.0; 4.0; 6.0 and 8.0 dS m⁻¹) and the conditions without (FL1 = 0) and with leach fraction (FL2 = 0.17), four repetitions. For assessment the nutritional status, the collection of the diagnostic leaf (leaf +3) was performed at four months after sprouting and four months after cutting, for plant cane and cane, for the determination of macronutrients (N, P, K, Ca, Mg and S), micronutrients (Cu, Fe, Mn, Zn, and Cl) and sodium (Na). At 365 days after planting (cane-plant) and cutting (cane-ratoon) the harvest was carried out and the plants were divided into stems and tips + leaves and weighed to determine the fresh and dry biomass. Samples of the plant parts were used to determine the levels and nutritional and sodium accumulations, multiplying the dry matter by the nutrient content in the respective compartment. The increase in the salinity of the irrigation water reduced the leaf contents of N, P, K, Mg, S, Fe, Mn, C, and Zn and increased the levels of Ca, Cl and Na for both cultivation cycles (cane-plant and ratoon). Except for Ca, Cl and Na, the extraction and export of nutrients were negatively affected by the increase in the salinity of the irrigation water in the cane-plant and the clump. The order of extraction and export of nutrients and sodium by the variety RB92579 (cane-plant and clog) was: without leaching (N > K > Ca > Mg > P > S > Fe > Mn > Cl > Na > Zn > Cu) and with leaching fraction (N > K > Mg > Ca > P > S > Fe > Mn > Cl > Na > Zn > Cu). The production of biomass was negatively affected by the increase in irrigation water salinity. The use of the leaching fraction (0.17) reduced the effects of salinity on nutritional levels and productivity and promoted greater extractions and exports of macronutrients and micronutrients by the culture in both cultivation cycles and lesser Ca, Cl and Na.

Keywords: *Saccharum* spp., salinity, mineral nutrition, green mass yield

CAPÍTULO III: ESTADO NUTRICIONAL, EXTRAÇÃO E EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA COM ÁGUAS SALOBRAS E FRAÇÃO DE LIXIVIAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, açúcar e etanol. Na safra 2018/2019 a área colhida foi de 8,59 milhões de hectares e a produção de 620,44 milhões de toneladas, correspondentes a 33,25 (área colhida) e 34,74% (produção) do total mundial, respectivamente, com produtividade média de 72,23 Mg ha⁻¹. O estado de São Paulo é o maior produtor; Pernambuco ocupa o sétimo lugar com produtividade de média de 49,40 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2019).

A região Nordeste abrange uma área de 1,56 milhões de km² (18,3% do território nacional), sendo 61,68% correspondente ao semiárido (IBGE, 2018; INMET, 2019). Sobretudo nessa região, onde a precipitação se concentra no período de em três a cinco meses, se faz necessário o uso de irrigação para obtenção de rendimentos satisfatórios (MARIN & NASSIF, 2013). Segundo Rodolfo Júnior et al. (2016), as variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação podem produzir de 100 a 150 Mg ha⁻¹.

As principais áreas de cultivo da cana-de-açúcar do Nordeste se concentram nos tabuleiros costeiros. Nestes locais problemas de salinização dos solos são frequentes em virtude do próprio material de origem do solo, da intrusão salina da água do mar, da deposição de sais pela ação das chuvas e dos ventos, das taxas de evapotranspiração muito superiores às lâminas de precipitação, aliados ao manejo inadequado de fertilizantes e às águas salobras que intensificam os processos de salinização e/ou sodificação dos solos (GHODRATI & GHAZARYAN, 2013; HANIN et al., 2016).

O acúmulo de sais no solo reduz o potencial osmótico da solução e a disponibilidade de água, além disso, a absorção em excesso de íons como o Na⁺ e Cl⁻ pode ocasionar fitotoxicidade (MANSOUR, 2014; TAIZ et al., 2017). Segundo Munns & Tester (2008), nessas condições o metabolismo vegetal é alterado e a abertura dos estômatos reduzida, assim como também a fotossíntese e a translocação de nutrientes reduzindo o seu potencial de produção.

Nos casos em que os níveis salinos são prejudiciais às plantas, geralmente, o uso da fração de lixiviação se torna fundamental para um manejo adequado de irrigação,

podendo mitigar os efeitos deletérios da salinidade nas plantas. A fração de lixiviação é a razão entre a lâmina necessária para satisfazer a demanda hídrica da cultura e a lâmina que percola abaixo da zona radicular, sendo calculada em função da condutividade elétrica da água de irrigação e da água drenada (AYERS & WESTCOT, 1999; PUGA et al., 2016; ZHANG et al., 2019). No entanto, o êxito dessa operação depende essencialmente da existência de um sistema de drenagem eficiente que permita a lixiviação dos sais da zona radicular (BERNARDO et al., 2019).

Devido a elevada produção de biomassa, a cana-de-açúcar extrai do solo e aloca na planta uma grande quantidade de nutrientes (OLIVEIRA et al. 2011; LIRA et al., 2019). Segundo Malavolta et al. (1997) o monitoramento da fertilidade do solo e a diagnose foliar são as principais ferramentas utilizadas para manejo nutricional da cultura. Além disso, os conceitos de extração e exportação de nutrientes permitem indicar quanto será necessário repor após as sucessivas colheitas, bem como a época mais adequada de aplicação.

Sob condições de estresse salino, são escassos os trabalhos que avaliaram a extração e a exportação de nutrientes em cana-de-açúcar, principalmente utilizando variedades recentemente disponibilizadas aos produtores. Assim, objetivou-se com este trabalho avaliar o estado nutricional, a extração e a exportação de nutrientes e de sódio e a produtividade da cana-de-açúcar (RB92579) irrigada com águas salobras e condições de lixiviação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização e caracterização da área de estudo

O experimento foi conduzido em lisímetros de drenagem no Departamento de Engenharia Agrícola (DEAGRI), da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife - PE, cujas coordenadas geográficas no sistema SIRGAS 2000 (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas) são 8° 01' 06" de latitude Sul e 34° 56' 49" de longitude Oeste, e altitude de 6,5 m.

A área total utilizada tem dimensões de 2400 m² (32 x 75 m), sendo localizada na parte central uma estação lisimétrica (18 x 25,80 m) composta por 40 lisímetros de drenagem (1 m³). Os lisímetros são conectados a uma casa de coleta do lixiviado por meio de um sistema de drenagem subterrânea com tubos de PVC com DN 50 mm. Em área anexa à estação lisimétrica há uma estação meteorológica automática (Campbell

Scientific, CR1000) (18 x 14,2 m) utilizada para obtenção de dados climáticos (precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar global), para manejo da irrigação.

Os lisímetros foram preenchidos com solo proveniente do município de Goiana, PE (7° 33' 38" de latitude Sul e 35° 00' 09" de longitude Oeste e altitude de 13 m), classificado como Espodosolo Humilúvico de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2013), correspondente a Spodosol Orthod na classificação U.S. Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2014).

Foi coletada com auxílio de uma retroescavadeira a camada correspondente à profundidade de 0-0,40 m, cujas características físico-químicas e hídricas determinadas segundo metodologia da EMBRAPA (2011) podem ser observadas na Ta: areia, silte e argila = 890, 30 e 80 g kg⁻¹, respectivamente, classe textural = areia, densidade do solo = 1,69 kg dm⁻³, densidade da partícula = 2,63 kg dm⁻³, umidade volumétrica (0,33 atm) = 3,02%, umidade volumétrica (15 atm) = 1,34%, matéria orgânica = 15,35 g kg⁻¹, pH_(H₂O) = 6,5, P = 49 mg dm⁻³, K⁺ = 0,08 cmol_c dm⁻³, Ca²⁺ = 1,6 cmol_c dm⁻³, Mg²⁺ = 0,65 cmol_c dm⁻³, Na⁺ = 0,06 cmol_c dm⁻³, Cu = 0,78 mg dm⁻³, Zn = 0,43 mg dm⁻³, Mn = 0,62 mg dm⁻³, H⁺+Al³⁺ = 3,05 cmol_c dm⁻³, Al³⁺ = 0 cmol_c dm⁻³, capacidade de troca de cátions = 5,44 cmol_c dm⁻³, saturação por bases = 44,26%, saturação por alumínio = 0%, soma de bases = 2,39 cmol_c dm⁻³, Percentagem de sódio trocável = 1,10 %, CEes = 0,42 dS m⁻¹.

2.2. Manejo da cultura e tratamentos

Foram avaliados dois ciclos de cultivo da cana-de açúcar (RB92579), sendo a cana-planta plantada em novembro 2016 e colhida novembro de 2017, e a cana-soca colhida em novembro de 2018. O material vegetal utilizando foi proveniente da Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC-UFRPE) e no plantio foram colocados seis rebolos (~ 0,30 m cada) por metro linear, com duas gemas cada, realizando-se um desbaste após a emergência para permanência de 8 plantas m⁻¹. O espaçamento entre linhas foi de 1,2 m.

De acordo com a Recomendação de adubação para o Estado de Pernambuco (CAVALCANTI et al., 2008), na cana-planta foi realizada adubação mineral, sendo aplicado na fundação 20 kg ha⁻¹ de N, 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 35 kg ha⁻¹ de K₂O. Aos 45 e 150 dias após o plantio (DAP) foi realizada a adubação de cobertura aplicando-se 20 kg ha⁻¹ de N e 35 kg ha⁻¹ de K₂O. A aplicação de micronutrientes foi realizada via

adubação foliar aplicando-se 1,3 kg ha⁻¹ Cu, 2,0 kg ha⁻¹ de Zn e 2,6 kg ha⁻¹ de Mn. No segundo ciclo (cana-soca), foi realizada aos 30, 90 e 150 dias após o corte (DAC) foi realizada a adubação de cobertura aplicando-se 30 kg ha⁻¹ de N e 40 kg ha⁻¹ de K₂O. Também foi realizada a adubação foliar com 1,3 kg ha⁻¹ Cu, 2,0 kg ha⁻¹ de Zn e 2,6 kg ha⁻¹ de Mn.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado em esquema fatorial 5 x 2, com quatro repetições, sendo estes compostos por: cinco níveis de salinidade da água de irrigação (CEa = 0,5; 2,0; 4,0; 6,0 e 8,0 dS m⁻¹) e as condições sem (FL1 = 0) e com fração de lixiviação (FL2 = 0,17), correspondentes a 100 e 120% da evapotranspiração da cultura (ETc).

Os níveis de salinidade da água de irrigação foram obtidos com adição de NaCl e CaCl₂.H₂O (P.A.) na proporção de 1:1 molar (Ca:Na) a água de abastecimento local (CEa = 0,5 dS m⁻¹) em quantidades necessárias para obtenção das respectivas condutividades elétricas, conforme Richards (1954):

$$Q_s = 640 \times CEa, \text{ quando } CEa < 5,0 \text{ dS}^{-1}$$

$$Q_s = 800 \times CEa, \text{ quando } CEa > 5,0 \text{ dS}^{-1}$$

em que,

Q_s - quantidade de sais (mg L⁻¹); CEa - valor desejado da condutividade elétrica da água (dS m⁻¹).

Foram utilizadas cinco caixas (1000 L) para mistura dos sais correspondentes aos níveis de salinidade, nas quais foram acopladas eletrobombas centrífugas de eixo horizontal (Modelo QB80, 0,5 CV). O sistema de irrigação utilizado foi por gotejamento com gotejadores autocompensantes de perda de carga hidráulica (tipo PCJ/CNL NetafimTM), espaçados a 0,30 m, vazão unitária de 4,1 L h⁻¹ e intensidade de aplicação de 11,40 mm h⁻¹.

A aplicação dos tratamentos iniciou-se aos 60 DAP e 45 DAC, para cana-planta e cana-soca, respectivamente, sendo realizadas irrigações diárias baseadas na ETc, obtida pelo produto da evapotranspiração de referência (ETo) pelo coeficiente de cultivo (Kc) e pelo coeficiente de localização (KI). A ETo foi estimada pelo método de Penman-Monteith parametrizado no Boletim 56 da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura - FAO (ALLEN et al., 1998) a partir dos dados climáticos coletados na estação meteorológica automática. O Kc utilizado foi correspondente a cada fase fenológica de acordo com Doorenbos & Pruitt (1977) e o KI foi determinado segundo metodologia proposta por Keller & Bliesner (1990).

Na cana-planta, a lâmina de água recebida via precipitação pluvial ao longo do período foi de 1629 mm (Figura 1), concentrada principalmente entre os meses de março a junho (1042 mm). A precipitação ficou abaixo da normal climatológica do município que é de 2263 mm ano⁻¹ de acordo com o INMET (2019). A evapotranspiração de referência acumulada ao longo do ciclo de cultivo foi de 1308 mm (3,56 mm d⁻¹). As lâminas de irrigação aplicadas com base em 100 e 120% da ETc, correspondentes as condições de lixiviação FL1= 0 e FL2 = 0,17, foram de 522 (1,43 mm dia⁻¹) e 609 mm (1,67 mm dia⁻¹), respectivamente.

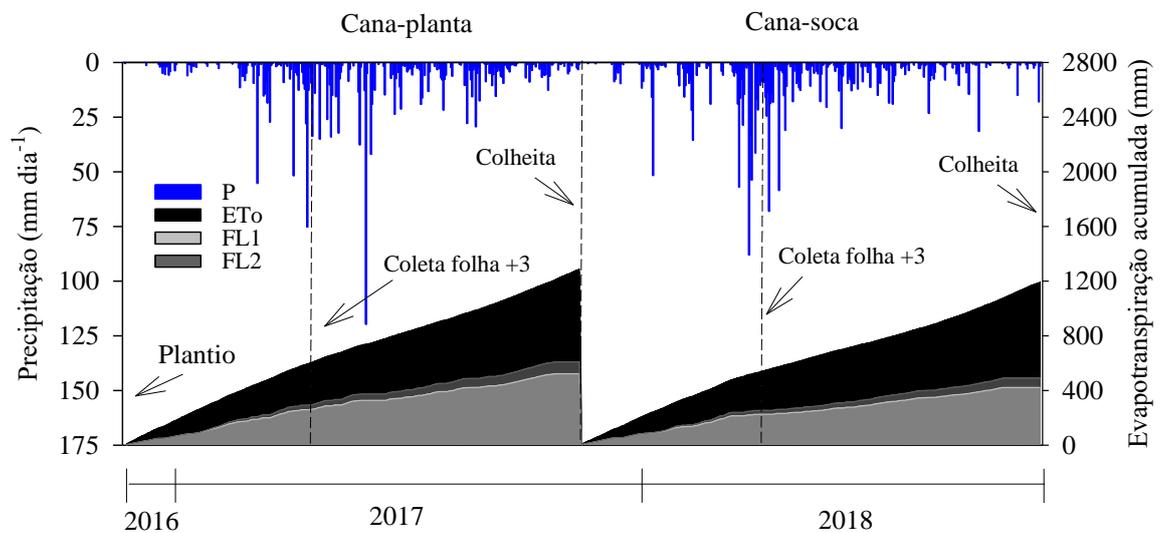


Figura 1. Precipitação (P), evapotranspiração de referência acumulada (ETo), evapotranspiração da cultura acumulada correspondente a 100 (FL1 = 0) e 120% da ETC (FL2 = 0,17).

Na cana-soca (Figura 1), a precipitação acumulada ao longo do período foi de 1710 mm, concentrada principalmente entre março e junho (1069 mm). Apesar da maior lâmina de precipitação ocorrida no período da cana-soca, a média também se encontrou abaixo da normal climatológica. A evapotranspiração de referência acumulada ao longo do ciclo de cultivo foi de 1190 mm (3,23 mm dia⁻¹). As lâminas de irrigação acumuladas na FL1 e FL2, foram de 422 (1,14 mm dia⁻¹) e 490 mm (1,33 mm dia⁻¹), respectivamente.

2.3. Análise nutricional (teores de macronutrientes, micronutrientes e sódio)

Para determinação do estado nutricional da cana-de-açúcar foi realizada a coleta da folha diagnóstico que é a terceira folha da haste com barbela da bainha visível conhecida como folha TVD (Top Visible Dewlap) ou folha +3 (Kuijper). As coletas foram realizadas aos quatro meses após a brotação e quatro meses após o corte, para cana-planta e cana-soca, respectivamente, conforme recomendado por Malavolta et al. (1997).

Em seguida, as folhas foram levadas para o laboratório, lavadas com água deionizada, sendo cada folha dividida em três partes, cortando a parte central (terço mediano) em aproximadamente 30 centímetros da qual foi excluída a nervura principal conforme Malavolta et al. (1997). Posteriormente, essas folhas foram acondicionadas em sacos de papel devidamente identificados com os respectivos tratamentos e, colocadas para secar em estufa com circulação forçada de ar (65 °C) até obtenção da massa seca (MS) constante.

O material seco foi processado em moinho do tipo Willey com peneira de 2 mm e acondicionado em recipientes fechados para posterior quantificação dos teores foliares dos macronutrientes (g kg^{-1}): nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S); micronutrientes (mg kg^{-1}): cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e cloreto (Cl); íon sódio (g kg^{-1}): sódio (Na).

A extração dos nutrientes do tecido vegetal (exceto N) foi realizada por meio da digestão via úmida (ácido nítrico) em extrator de amostras (tipo batch - refluxo), via micro-ondas, conforme metodologia proposta por Silva (2009). A extração do N foi realizada digestão sulfúrica em bloco digestor, segundo metodologia de Bezerra Neto & Barreto (2011).

A quantificação dos teores nutricionais para os dois ciclos de cultivo (cana-planta e cana-soca) foi realizada segundo a metodologia de Bezerra Neto & Barreto (2011): nitrogênio total pelo método de arraste de vapor (Kjeldahl) e titulação; fósforo pelo método colorimétrico do molibdato-vanadato, em espectrofotômetro UV (420 nm); potássio e sódio pela técnica de fotometria de chama; enxofre pelo método turbidimétrico do sulfato de bário, em espectrofotômetro UV (470 nm); cálcio, magnésio, cobre, ferro, zinco e manganês por espectrofotometria de absorção atômica; cloreto por titulação pelo método de Mohr.

2.4. Análise nutricional (exportação e extração de macronutrientes, micronutrientes e sódio) e produção de biomassa

Aos 365 DAP e DAC foram realizadas as colheitas da cana-planta e cana-soca, respectivamente. Foram cortadas todas as plantas de cada lisímetro dos respectivos tratamentos, as quais foram divididas em colmos e ponteiros + folhas e, logo em seguida pesadas para determinação da biomassa fresca (MV, Mg ha⁻¹). Após isso, as partes separadas foram trituradas em máquina forrageira para homogeneização, retirada uma amostra que foi pesada para obtenção da biomassa fresca, acondicionadas em sacos de papel e colocadas em estufa de circulação forçada de ar (65 °C) até obtenção da massa seca constante. Pela massa seca da amostra foi feita a extrapolação da massa seca (MS, Mg ha⁻¹) de colmos e ponteira + folhas.

A amostra seca foi processada em moinho do tipo Willey com peneira de 2 mm e acondicionado em recipientes fechados para quantificação dos teores foliares dos macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), micronutrientes (Cu, Fe, Mn, Zn e Cl) e sódio (Na) conforme as metodologias de Silva (2009) e Bezerra Neto & Barreto (2011), descritas anteriormente.

O acúmulo de nutrientes nos colmos e nas ponteiros + folhas da cana-planta e cana-soca foram calculadas multiplicando-se a matéria seca de cada compartimento pelo teor de nutrientes no respectivo compartimento. A quantidade total extraída de nutrientes, foi obtida pela soma das quantidades acumuladas nos três compartimentos (colmo + ponteira + folha), ou seja, extração total de nutrientes do solo. A quantidade de nutrientes acumulada nos colmos é considerada como exportação de nutrientes, ou seja, a parte que foi efetivamente removida do solo.

2.5. Análise estatística

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade, homocedasticidade e análise de variância (ANOVA) pelo teste F ($p \leq 0,05$). Em seguida, os efeitos significativos para o fator salinidade foram comparados mediante análise de regressão ($p \leq 0,05$). A escolha do modelo de regressão baseou-se no maior valor de coeficiente de determinação (R^2), na significância dos parâmetros da equação de ajuste ($p \leq 0,05$), no efeito não significativo do desvio de regressão e na resposta biológica de cada variável em função dos tratamentos. As condições de lixiviação dentro de cada nível de

salinidade foram comparadas pelo teste de médias de Tukey ($p \leq 0,05$). As análises foram realizadas utilizando-se o software STATÍSTICA versão 10.0 (STATSOFT, 2010).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Estado nutricional (teores de macronutrientes, micronutrientes e sódio)

Na Tabela 1, constata-se que a interação entre a condutividade elétrica da água de irrigação (CEa = 0,5; 2,0; 4,0; 6,0 e 8,0 dS m⁻¹) e as condições sem (FL1) e com lixiviação (FL2) exerceu efeitos significativos sobre os teores foliares dos nutrientes e do sódio (exceto Zn na cana-planta) na cana-planta e cana-soca ($p \leq 0,05$).

Tabela 1. Resumo da análise de variância para os teores foliares de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), cloreto (Cl) e sódio (Na) em cana-planta e cana-soca sob diferentes níveis de salinidade da água de irrigação e condições de lixiviação

Cana-planta							
Quadrado médio							
Fonte de variação	GL	Macronutrientes					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Fração (FL)	1	139,31**	1,68**	23,07**	29,20**	0,62**	4,69**
Salinidade (CEa)	4	108,41**	3,24**	39,34**	29,23**	1,02**	4,37**
FL x CEa	4	4,18**	0,01**	0,29**	2,62**	0,02**	0,18**
Resíduo	30	0,128	0,001	0,047	0,003	0,001	0,006
CV	%	2,28	2,47	2,05	0,93	1,70	3,47
Fonte de variação	GL	Micronutrientes					Sódio
		Cu	Fe	Mn	Zn	Cl	Na
Fração (FL)	1	4,44**	1830,74**	456,97**	18,76**	4333503,32**	80,28**
Salinidade (CEa)	4	5,40**	3611,03**	551,50**	317,80**	5765025,82**	68,87**
FL x CEa	4	0,13**	23,63*	16,63**	1,16 ^{ns}	418185,08**	4,15*
Resíduo	30	0,001	7,447	1,459	0,969	3221,234	0,059
CV	%	0,70	2,93	3,30	3,68	8,89	4,37
Cana-soca							
Quadrado médio							
Fonte de variação	GL	Macronutrientes					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Fração (FL)	1	116,38**	0,72**	36,23**	54,00**	1,36**	4,92**
Salinidade (CEa)	4	114,70**	1,02**	42,19**	73,53**	0,76**	3,01**
FL x CEa	4	4,73**	0,01**	1,21**	3,99**	0,09**	0,26**
Resíduo	30	0,049	0,001	0,008	0,002	0,001	0,002
CV	%	1,32	1,92	0,76	0,75	2,11	2,21
Fonte de variação	GL	Micronutrientes					Sódio
		Cu	Fe	Mn	Zn	Cl	Na
Fração (FL)	1	2,07**	1165,21**	332,35**	145,46**	20712203,63**	101,21**
Salinidade (CEa)	4	7,52**	3451,96**	2956,84**	523,09**	7993398,65**	153,69**
FL x CEa	4	0,20**	79,95*	123,93**	8,80**	743030,93**	12,01*
Resíduo	30	0,002	4,382	39,301	0,762	11421,797	0,057
CV	%	0,77	2,19	2,50	2,31	9,35	1,46

** , * - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e ^{ns} - não significativo, pelo teste F.

O teor de zinco na cana-planta foi afetado pelos fatores de forma isolada ($p \geq 0,05$).

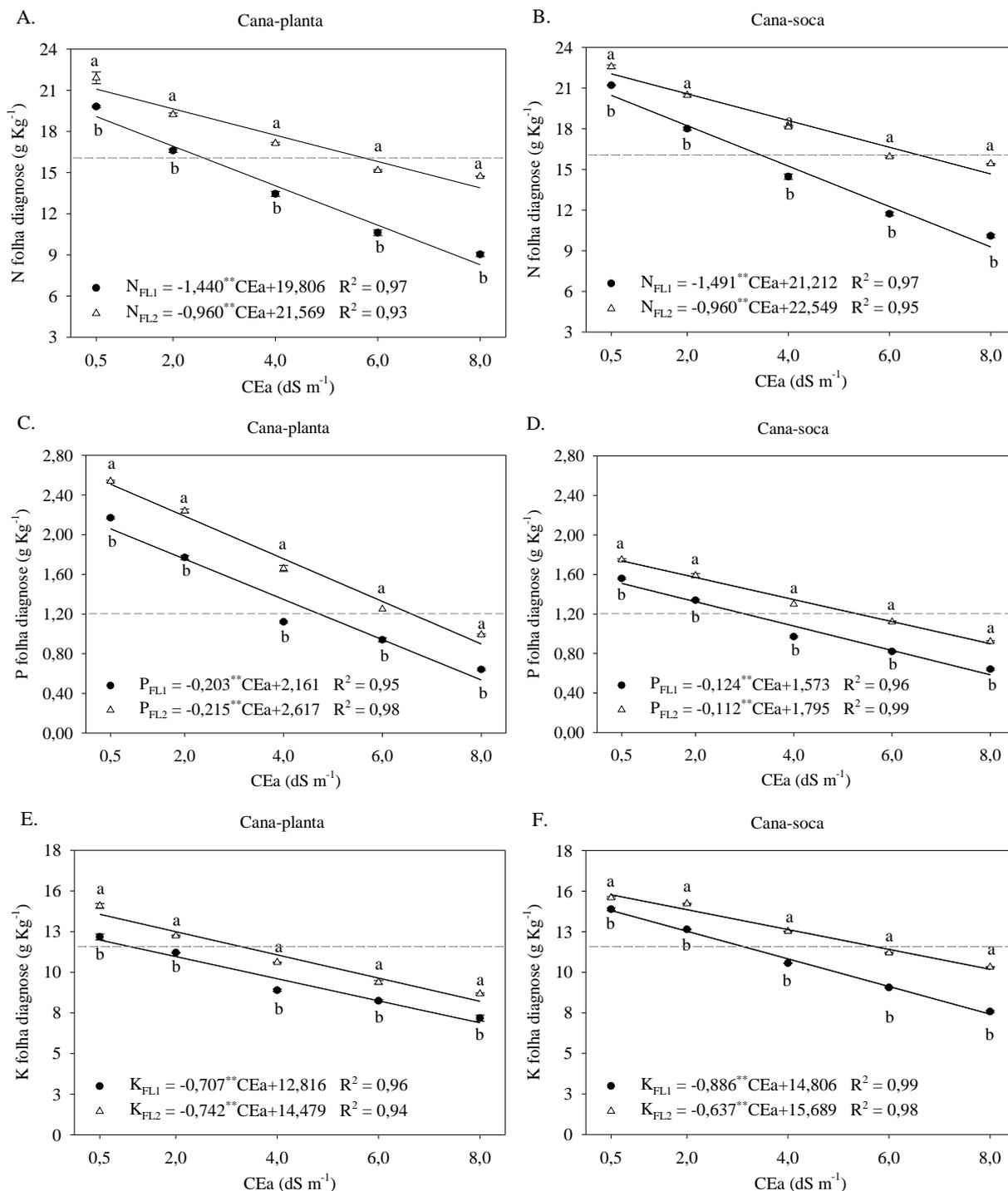
Foram observadas reduções lineares ($p \leq 0,05$) dos teores foliares dos nutrientes analisados (exceto Ca, Cl e Na) em função do aumento dos níveis de salinidade da água de irrigação para ambas as condições de lixiviação (FL1 e FL2).

Na Figura 2A (cana-planta), observa-se decréscimos de 1,44 e 0,96 g Kg⁻¹ de massa seca no teor de N para cada incremento unitário de salinidade para as condições sem (FL1) e com fração de lixiviação (FL2), respectivamente.

Na condição FL1, os valores médios estimados pela equação de regressão dos teores foliares de N foram de 19,09 e 8,29 g Kg⁻¹ para os níveis de salinidade da água de irrigação de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente, redução percentual de 56,6%, já na condição FL2 os teores médios foram de 21,09 e 13,89 g Kg⁻¹ (-34,14%). Em virtude de o N exercer função estrutural, participando de diversos compostos orgânicos e processos fisiológicos assume o papel principal crescimento das plantas e perfilhamento (PRADO et al., 2010).

Quando a ureia é hidrolisada há a produção de amônia e CO₂ pela enzima urease e nessas condições há perdas de N pela volatilização da amônia. Esse processo é mais intenso em solos com pH elevado, característica típica de solos sódicos ou salino sódicos (SANTOS et al., 2016). Segundo Lacerda et al. (2016) sob condições de salinidade a resposta das plantas a esse nutriente não apresenta a mesma eficiência, além disso, aplicações de elevadas doses de N em ambientes salinos pode resultar no aumento das perdas por lixiviação e posterior contaminação do lençol freático.

De acordo com Cavalcanti et al. (2008), plantas de cana-de-açúcar nutridas adequadamente apresentam teor foliar de nitrogênio de 16 g Kg⁻¹ representado na Figura pela reta tracejada, o que pôde ser observado até os níveis de salinidade da água de irrigação de 2,64 e 5,80 dS m⁻¹ para as condições sem e com fração de lixiviação, respectivamente. Os resultados evidenciam a eficiência da fração de lixiviação em minorar os efeitos dos sais nas plantas de cana-de-açúcar. De acordo com Zhang et al. (2019) a fração de lixiviação associada a um eficiente sistema de drenagem promove o deslocamento dos sais provenientes da água de irrigação e/ou os já existentes no solo para áreas mais profundas que a zona radicular.



** , * - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. Valores com letras diferentes indicam diferença significativa ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey nas condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.

---- Teores de macronutrientes considerados adequados (análise da folha +3) segundo Cavalcanti et al. (2008).

Figura 2. Teores de Nitrogênio (N) (A e B), Fósforo (P) (C e D), Potássio (K) (E e F) na cana-planta e soca, respectivamente, submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.

De modo geral, a cana-soca (Figura 2B) apresentou maiores teores foliares de N quando comparada a cana-planta e, apesar de serem observadas reduções semelhantes

para as condições sem (-54,6%) e com fração de lixiviação (-33,5%) na salinidade de 8,0 dS m⁻¹ quando comparada as plantas irrigadas com água de abastecimento (0,5 dS m⁻¹), os teores encontraram-se acima do nível crítico recomendado por Cavalcanti et al. (2008) até os níveis de 3,49 e 6,65 dS m⁻¹ para FL1 e FL2, respectivamente, valores estes mais elevados do que os observados no primeiro ciclo. As maiores lâminas de precipitação pluvial ocorridas antes da coleta da folha diagnóstico no segundo ciclo (Figura 1), contribuíram para uma maior lixiviação dos sais do ambiente radicular das plantas, mitigando os efeitos deletérios dos sais que possivelmente se refletiu em uma maior absorção de N em relação ao primeiro ciclo (cana-planta).

Lira et al. (2019) avaliaram os teores foliares de nutrientes na cana-de-açúcar (RB867515) submetida a níveis de salinidade da água de irrigação (0,5; 2,0; 3,5; 5,0 e 6,5 dS m⁻¹) e as condições sem (FL = 0) e com fração de lixiviação (FL = 0,17) em Recife - PE, obtendo para o nitrogênio reduções de 61,62 e 26,88%, para as respectivas condições de lixiviação, no nível de salinidade de 6,5 dS m⁻¹ quando comparada as plantas irrigadas com água de abastecimento (0,5 dS m⁻¹), corroborando com os achados do presente estudo.

Para P na cana-planta (Figura 2C) houve decréscimos de 0,203 e 0,215 g Kg⁻¹ para cada incremento unitário de salinidade para as condições sem (FL1) e com fração de lixiviação (FL2). Na condição FL1, os valores médios dos teores foliares de P foram de 2,06 e 0,54 g Kg⁻¹ (-73,9%) para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente, na condição FL2 os teores foram de 2,51 e 0,90 g Kg⁻¹, redução percentual de 64,2. Para P, até as salinidades de 4,73 (FL1) e 6,59 dS m⁻¹ (FL2), os teores foliares encontram-se dentro do nível crítico recomendado por Cavalcanti et al. (2008) que é de 1,2 g Kg⁻¹.

Na cana-soca (Figura 2D) houve resposta semelhante, sendo observadas reduções de 0,124 e 0,112 g Kg⁻¹ por incremento unitário de salinidade da água de irrigação promoveu para as condições FL1 e FL1, respectivamente. Até as salinidades de 3,0 e 5,29 dS m⁻¹, para as condições sem e com fração de lixiviação, respectivamente, os teores foliares encontram-se acima do nível crítico recomendado por Cavalcanti et al. (2008). Na média, os teores foliares desse nutriente encontraram-se bem abaixo daqueles observados na cana-planta, provavelmente associado ao fato de não ter sido realizada a adubação fosfatada no segundo ciclo de cultivo, sendo as maiores quantidades extraídas no primeiro ciclo de cultivo.

O fósforo é de fundamental importância para diversas funções na planta de cana-de-açúcar, com destaque na formação de proteínas e processos como a fotossíntese,

divisão celular e armazenamento de energia, sendo a maior necessidade encontrada nos três primeiros meses do estado de crescimento vegetativo, além disso, é um dos nutrientes que mais limitam a produção (BASTOS et al., 2008; SIMÕES NETO et al., 2009; GEBRIM et al., 2010).

A salinidade da água de irrigação promoveu decréscimos unitários de 0,707 e 0,742 g Kg⁻¹ nos teores de K (Figura 2E) para as condições sem e com fração de lixiviação, respectivamente, na cana-planta. Na condição FL1, os valores médios estimados dos teores foliares desse nutriente foram 12,46 e 7,16 g Kg⁻¹ para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente, redução percentual de 42,55% e na FL2 os teores médios foram de 14,11 e 8,54 g Kg⁻¹ (-39,45%). Plantas de cana-de-açúcar apresentam teor foliar médio de potássio de 12 g Kg⁻¹ de acordo com Cavalcanti (2008), sendo esse teor observado para as condições impostas na presente pesquisa até os níveis de salinidade da água de irrigação de 1,15 e 3,34 dS m⁻¹ para as condições sem e com fração de lixiviação, respectivamente.

Na cana-soca (Figura 2F) observa-se que cada incremento unitário de salinidade da água de irrigação promoveu reduções de 0,886 e 0,737 g Kg⁻¹ para as condições FL1 e FL2, respectivamente. Os teores médios encontraram-se acima do limite considerado crítico por Cavalcanti et al. (2008) até as salinidades de 3,17 e 5,79 dS m⁻¹, para as condições sem e com fração de lixiviação, respectivamente, níveis de salinidade mais elevados do que observado no primeiro ciclo o que pode ser explicado pelas maiores lâminas de precipitação pluvial ocorridas no segundo ciclo. Segundo Taiz et al. (2017) os colmos de plantas de cana-de-açúcar deficientes em potássio ficam delgados e fracos, com entrenós anormalmente curtos.

De acordo com Deinlein et al. (2014) elevados teores de Na⁺ no solo inibe a absorção de nutrientes, sendo K⁺ o mais prejudicado principalmente pelo antagonismo iônico entre esses dois íons monovalentes devido a competição pelos sítios de absorção e transporte através da membrana plasmática. Na presente pesquisa observa-se uma correlação negativa entre os teores foliar de K (Figura 2E e F) e Na (Figura 5E e F) nos dois ciclos de cultivo, ou seja, concentrações crescentes de Na na água de irrigação promoveu maiores teores foliares desse íon e reduções nos teores de K.

As reduções nos teores de K ocorreram para ambas as condições de lixiviação, no entanto, pode-se observar um efeito mais pronunciado nos tratamentos sem fração de lixiviação (FL1) que promoveu maiores acúmulos de sais na zona radicular das plantas de cana-de-açúcar. De acordo com Mansour (2014) o acúmulo de sais reduz o potencial

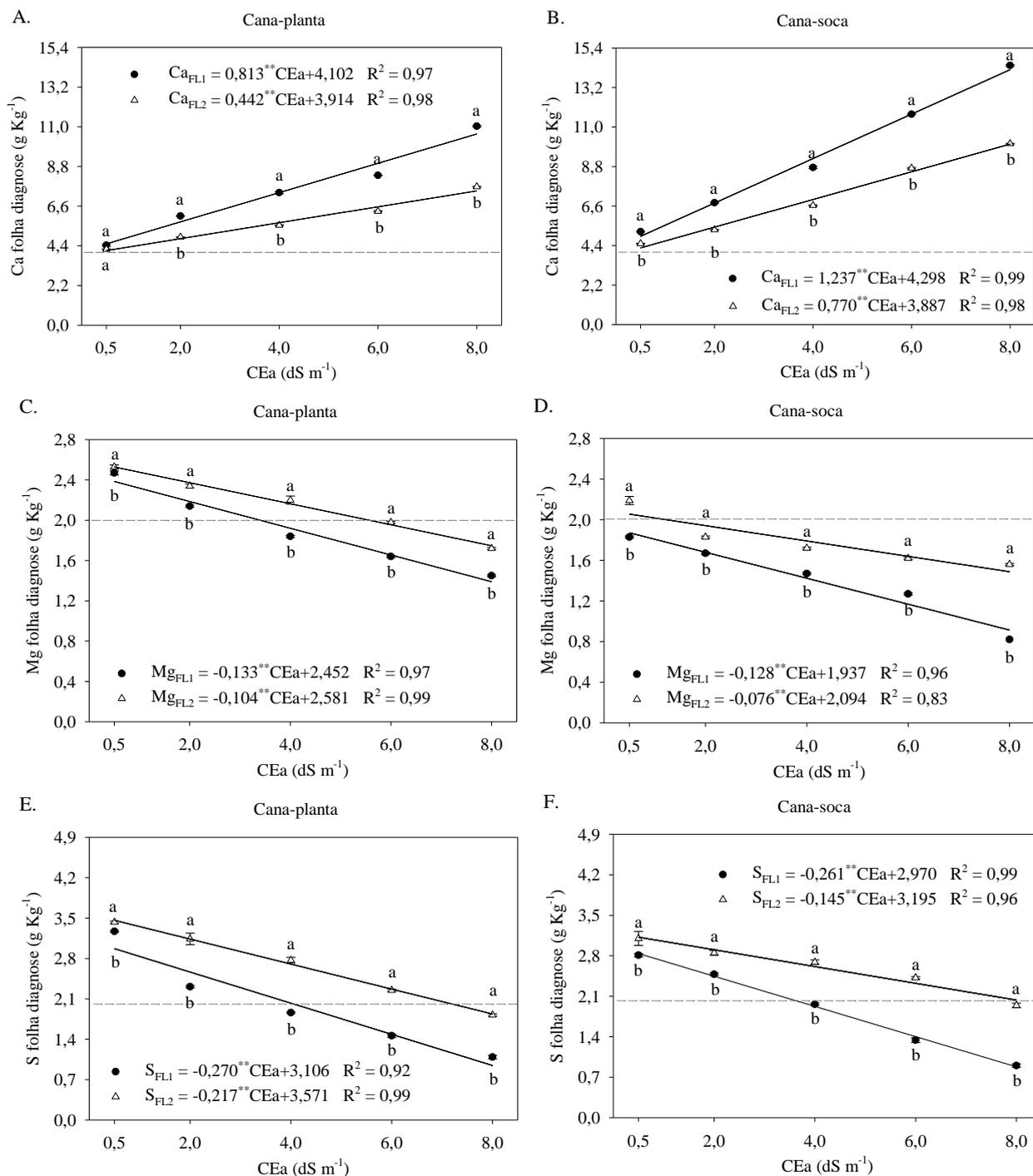
osmótico da solução do solo e a disponibilidade de água e, os efeitos iônicos específicos resultantes da absorção de íons tóxicos (Na^+ e Cl^-) interferem na absorção de nutrientes e provocam fitotoxicidade.

Para Ca (Figura 3A e B), pode-se observar acréscimos nos teores foliares com o aumento dos níveis de salinidade da água de irrigação para ambas as condições de lixiviação nos ciclos de cana-planta e cana-soca, respectivamente.

Na cana-planta (Figura 3A), houve incremento de 0,813 e 0,442 g Kg^{-1} no teor de Ca para cada aumento unitário de salinidade para as condições sem e com fração de lixiviação, respectivamente. Na condição FL1, os teores médios foliares de Ca variaram de 4,51 e 10,61 g Kg^{-1} para os níveis de salinidade de 0,5 e 8,0 dS m^{-1} , respectivamente, um aumento expressivo de 135,24%, para FL2 os teores foram de 4,14 e 7,45 g Kg^{-1} (+80,17%). Em todos os níveis de salinidade da água avaliados, os teores de cálcio encontram-se acima de 4 g Kg^{-1} , teor recomendado por Cavalcanti et al. (2008).

Na Figura 3B, pode-se observar aumentos mais significativos nos teores foliares de Ca para cana-soca quando comparada a cana-planta. Cada incremento unitário na salinidade da água de irrigação promoveu aumentos de 1,237 e 0,770 g Kg^{-1} nos teores de Ca para as condições sem e com fração de lixiviação, respectivamente. Nas condições FL1 e FL2, foram constatados aumentos percentuais de 188,70 e 135,18%, respectivamente, no nível de salinidade de 8,0 dS m^{-1} quando comparada as plantas irrigadas com água de abastecimento (0,5 dS m^{-1}). Na cana-soca a faixa de teor foliar de cálcio considerado ideal por Malavolta et al. (1997) é de 5-7 g Kg^{-1} , nas condições deste estudo o limite superior (7 g Kg^{-1}) foi excedido quando as plantas foram irrigadas com águas de salinidade superiores a 2,18 e 4,04 dS m^{-1} , para as condições sem e com fração de lixiviação, respectivamente.

Pesquisas realizadas por Costa et al. (2008) e Lira et al. (2015) constataram que o aumento da concentração de NaCl na água de irrigação, elevou os teores Cl^- e Na^+ , ocasionou redução nos teores de N, K, Ca e Mg nas raízes das plantas. No presente estudo, foi observado aumentos nos teores foliares de Cl (Figura 5C e D) e Na (Figura 5E e F) e redução dos teores de N (Figura 2A e B), K (Figura 2E e F) e Mg (Figura 3C e D), verificou-se ainda que, para ambas as condições de lixiviação (FL1 e FL2), houve aumento nos teores foliares de Ca em função do aumento da CEa (Figura 3A e B).



******, ***** - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. Valores com letras diferentes indicam diferença significativa ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey nas condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.

---- Teores de macronutrientes considerados adequados (análise da folha +3) segundo Cavalcanti et al. (2008).

Figura 3. Teores de Cálcio (Ca) (A e B), Magnésio (Mg) (C e D), Enxofre (S) (E e F) na cana-planta e soca, respectivamente, submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.

O aumento nos teores de cálcio é justificado uma vez que além de NaCl, o $CaCl_2$ também foi utilizado para salinização das águas de irrigação, promovendo altas

concentrações de Ca, favorecendo a sua absorção. O mesmo comportamento também foi observado em outras pesquisas avaliando os efeitos do estresse salino promovido pelos mesmos sais, nos teores de nutrientes em variedades de cana-de-açúcar (GANDONOU et al., 2011; MAQBOOL et al., 2016; LIRA et al., 2019).

Para o Mg (Figura 3C) houve decréscimos de 0,133 e 0,104 g Kg⁻¹ para cada incremento unitário de salinidade para as FL1 e FL2, respectivamente, na cana-planta. Na condição FL1, foram observados valores médios dos teores foliares de Mg de 2,39 e 1,39 g Kg⁻¹ (-41,82%) e na FL2 teores 2,53 e 1,73 g Kg⁻¹ (-30,84%) para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente. Até os níveis de salinidade 3,40 (FL1) e 5,39 dS m⁻¹ (FL2), os teores foliares de Mg mantiveram-se acima do limite crítico recomendado por Cavalcanti et al. (2008) que é de 2,0 g Kg⁻¹.

Na cana-soca (Figura 3D) pode-se observar que o incremento dos níveis de salinidade da água promoveu reduções mais acentuadas nos teores de Mg, com reduções de 0,128 e 0,076 g Kg⁻¹ dS m⁻¹ para as condições FL1 e FL2, respectivamente. Na FL1 os teores encontraram-se abaixo do recomendado por Cavalcanti et al. (2008) em todos os níveis de CEa, sendo constatada redução de 51,25% nos teores foliares das plantas irrigadas com 8,0 dS m⁻¹ quando comparada àquelas irrigadas com água de abastecimento, já com a FL2 a redução para estas mesmas condições foi 27,72%, sendo os teores mantidos acima de 2,0 g Kg⁻¹ (CAVALCANTI et al., 2008) até a CEa = 1,24 dS m⁻¹. Esses resultados são justificados principalmente pelos teores foliares mais elevados de Ca e Na na cana-soca.

O magnésio pode ser absorvido pelas raízes das plantas a partir da solução do solo, no entanto, a taxas baixas por não haver um mecanismo especial de absorção para o transporte através da membrana plasmática, além disso, sua absorção pode ser largamente reduzida por um excesso de outros cátions, especialmente K⁺ e Na⁺ e sua translocação para as partes superiores da planta pode ser restringida pelos íons K⁺ e Ca²⁺ (RICHART & KOTZ, 2017; TAIZ et al., 2017).

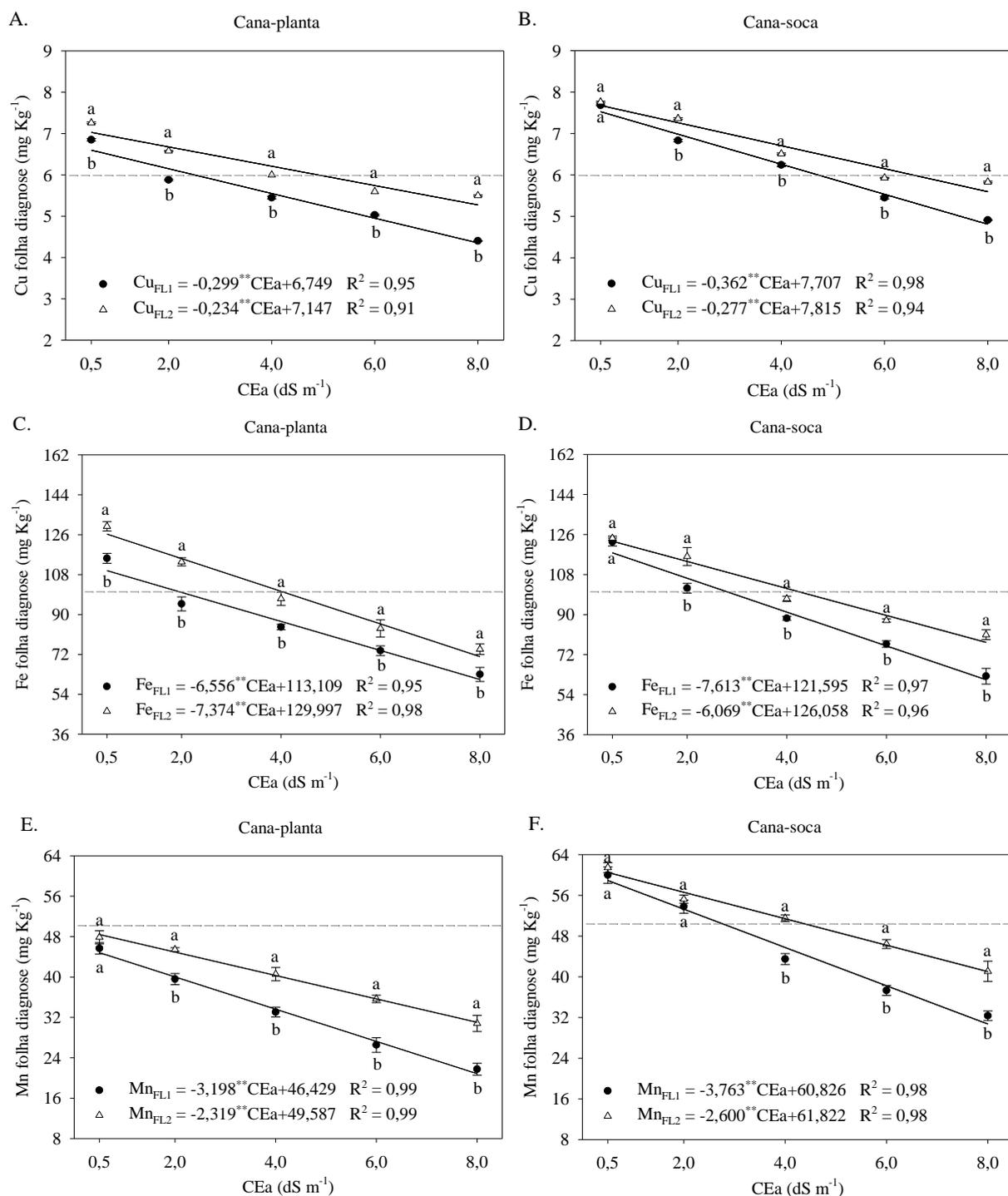
Na cana-planta, os teores de S decresceram 0,270 e 0,217 g Kg⁻¹ de massa seca para cada incremento unitário de salinidade nas condições FL1 e FL2 (Figura 3E). Nas condições FL1 e FL2, o aumento dos níveis de salinidade da água de irrigação promoveu reduções nos teores foliares de S de 68,16 e 47,00%, respectivamente, na CEa = 8,0 dS m⁻¹ quando comparada a de 0,5 dS m⁻¹. De acordo com Cavalcanti et al. (2008), o teor foliar de magnésio de plantas de cana-de-açúcar bem nutridas é de 2 g Kg⁻¹, valores observados na presente pesquisa até as salinidades de 4,10 e 7,24 dS m⁻¹.

Ainda pode-se verificar por meio da Figura 3F que na cana-soca, os teores foliares de S foram semelhantes aos observados no primeiro ciclo (cana-planta), sendo observadas reduções de 68,94 e 34,83% para as condições sem e com fração de lixiviação, respectivamente. Sem uso da fração de lixiviação, os teores de enxofre se mantiveram acima do nível crítico citado por Cavalcanti et al. (2008) até a CEa = 3,72 dS m⁻¹, no entanto, nos tratamentos em que se adotou a fração de lixiviação de 0,17 (FL2) os teores encontrados se mantiveram acima do recomendado por Cavalcanti et al. (2008) em todos os níveis salinos avaliados. Esses resultados destacam a importância do uso da lixiviação em mitigar os efeitos do estresse salino, principalmente, em relação a absorção de nutrientes importantes para a cana-de-açúcar a exemplo do enxofre.

O enxofre é um constituinte de compostos orgânicos como aminoácidos essenciais (cisteína, metionina e cistina) envolvidos na produção de clorofila, portanto, é necessário para a síntese proteica e tem função estrutural na planta (RICHART & KOTZ, 2017). Ainda segundo os autores, plantas de cana-de-açúcar deficientes em enxofre ficam atrofiadas com folhas verde pálido a amarelo, reduzindo o vigor e, conseqüentemente, o rendimento. Além disso, a adubação nitrogenada não é eficiente se o S for deficiente.

Com exceção do cloreto, os demais micronutrientes reduziram com o incremento da salinidade da água de irrigação. Houve decréscimos nos teores foliares do cobre na cana-planta (Figura 4A) de 0,299 e 0,234 g Kg⁻¹ dS m⁻¹ nas condições sem e com fração de lixiviação, respectivamente. Foram observados valores médios dos teores foliares de Cu de 6,60 e 4,36 mg Kg⁻¹ (-33,98%) na condição sem lixiviação e 6,68 e 5,28 mg Kg⁻¹ (-24,96%) com lixiviação, nas salinidades de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente. Para esse micronutriente, Cavalcanti et al. (2008) recomendam um teor foliar médio de 6 mg Kg⁻¹ de massa seca, sendo observados no presente estudo teores maiores e/ou iguais nas folhas das plantas irrigadas com salinidades até 2,51 (FL1) e 4,90 dS m⁻¹ (FL2).

Além dos efeitos da salinidade da água de irrigação que promoveram reduções nos teores foliares do cobre, segundo Malavolta et al. (1997) a sua absorção pode ser inibida fortemente pela absorção do zinco, o que pode ser confirmado pelos elevados teores foliares de zinco obtidos no presente estudo (Figura 5A e B).



** , * - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. Valores com letras diferentes indicam diferença significativa ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey nas condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.

---- Teores de micronutrientes considerados adequados (análise da folha +3) segundo Cavalcanti et al. (2008).

Figura 4. Teores de Cobre (Cu) (A e B), Ferro (Fe) (C e D), Manganês (Mn) (E e F) na cana-planta e soca, respectivamente, submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.

Na cana-soca (Figura 4B) pode-se observar que apesar das reduções nos teores foliares do Cu em função do aumento dos níveis de salinidade da água de irrigação, os

teores encontraram-se mais elevados do que os obtidos para cana-planta. Na condição FL1, os valores médios teor de Cu de 7,53 e 4,81 g Kg⁻¹ (-36,07%) e na FL2 teores 7,68 e 5,60 g Kg⁻¹ (-27,06%), respectivamente, para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente. Os teores foliares desse nutriente mantiveram-se acima do limite crítico recomendado por Cavalcanti et al. (2008) (6 mg Kg⁻¹) até os níveis de salinidade 4,72 (FL1) e 6,55 dS m⁻¹ (FL2).

Apesar dos elevados teores foliares do zinco na cana-soca (Figura 5B) o qual é um dos principais nutrientes que inibem a absorção do cobre, as maiores lâminas de precipitações pluviais ocorridas nesse ciclo mitigaram os efeitos da salinidade promovendo a lixiviação dos sais da zona radicular da cultura. Segundo Taiz et al. (2017), o cobre desempenha um papel fundamental no metabolismo de nitrogênio, proteínas e hormônios; fotossíntese e respiração; e formação de pólen, além de ser componente de enzimas envolvidas na síntese de lignina.

Os teores foliares de Fe (Figura 4C) na cana-planta reduziram com a salinidade da água de irrigação, sendo observados decréscimos de 6,556 e 7,374 mg Kg⁻¹ dS m⁻¹ nas condições sem e com fração de lixiviação, respectivamente. Na condição sem fração de lixiviação nos níveis de salinidade 0,5 e 8,0 dS m⁻¹ foram observados teores foliares de Fe de 109,83 e 60,66 mg Kg⁻¹ (-44,77%), já com a fração de lixiviação os teores foram 126,31 e 71,01 mg Kg⁻¹ (-43,79%) para as respectivas salinidades.

Segundo Cavalcanti et al. (2008), plantas de cana-de-açúcar bem nutridas apresentam teor foliar de ferro de 100 mg Kg⁻¹, o que pode ser observado no presente estudo até os níveis de salinidade 2,00 e 4,07 dS m⁻¹ para as condições FL1 e FL2, respectivamente. As reduções percentuais para ambas as condições de lixiviação foram semelhantes, no entanto, pode-se observar que nos tratamentos em que se fez uso da fração de lixiviação as plantas mantiveram os teores foliares em níveis adequados até níveis mais elevados de salinidade da água de irrigação, destacando a sua importância na manutenção do equilíbrio nutricional em ferro.

Na cana-soca (Figura 4D), os teores foliares de Fe foram semelhantes aos observados no ciclo de cana-planta, apresentando reduções de 48,47 e 37,00% para as condições FL1 e FL2, respectivamente. Os teores foliares de ferro se mantiveram acima do recomendado por Cavalcanti et al. (2008) até a CEa = 2,84 e 4,29 dS m⁻¹, para as respectivas condições de lixiviação. A função mais conhecida do ferro está relacionada aos sistemas enzimáticos em grupos protéticos, desempenhando um papel na estrutura porfirina de clorofilas, além disso, a ferredoxina funciona como um sistema redox na

fotossíntese, na redução do nitrito, na redução do sulfato e na assimilação do nitrogênio (MALAVOLTA et al., 1997; RICHART & KOTZ, 2017). Ainda de acordo com os autores, a absorção de ferro é significativamente influenciada pela presença de Cu^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Zn^{2+} .

Na Figura 4E, observa-se que o aumento da salinidade da água de irrigação promoveu decréscimos unitários de 3,198 e 2,319 $\text{mg Kg}^{-1} \text{ dS m}^{-1}$ nos teores de Mn para as condições sem e com fração de lixiviação, respectivamente, resultando em reduções percentuais de 53,50 (FL1) e 35,91% (FL2) no nível mais alto de CEa ($8,0 \text{ dS m}^{-1}$) quando comparado a água de abastecimento ($0,5 \text{ dS m}^{-1}$). Para o manganês, Cavalcanti et al. (2008) recomendam teor foliar médio de 50 mg Kg^{-1} ; no presente estudo para ambas as condições de lixiviação, os teores foliares desse nutriente encontraram-se abaixo do nível crítico.

A presença de outras espécies de cátions na solução do solo influencia a disponibilidade de manganês, particularmente o Ca e o Mg reduzem a absorção de Mn pelas plantas (MALAVOLTA et al., 1997). Segundo Taiz et al. (2017) o manganês ativa várias enzimas nas células vegetais como descarboxilases e as desidrogenases envolvidas no ciclo do ácido cítrico (ciclo de Krebs), sendo o sintoma principal da sua deficiência a clorose entre as nervuras, associada ao desenvolvimento de pequenas manchas necróticas.

Na cana-soca (Figura 4F), para a condição sem lixiviação nos níveis de salinidade 0,5 e $8,0 \text{ dS m}^{-1}$ os teores foliares de Mn foram 58,94 e $30,72 \text{ mg Kg}^{-1}$ (-44,88%) e com fração de lixiviação 60,52 e $41,02 \text{ mg Kg}^{-1}$ (-32,22%) para as respectivas salinidades. Os teores médios encontraram-se acima do limite considerado crítico por Cavalcanti et al. (2008) até as salinidades de 2,88 e $4,55 \text{ dS m}^{-1}$, para as condições sem e com fração de lixiviação, respectivamente. Segundo Santos et al. (2016) solos afetados por sais geralmente apresentam pH alcalinos o que reduz sua disponibilidade devido a menor solubilidade dos compostos que o contêm.

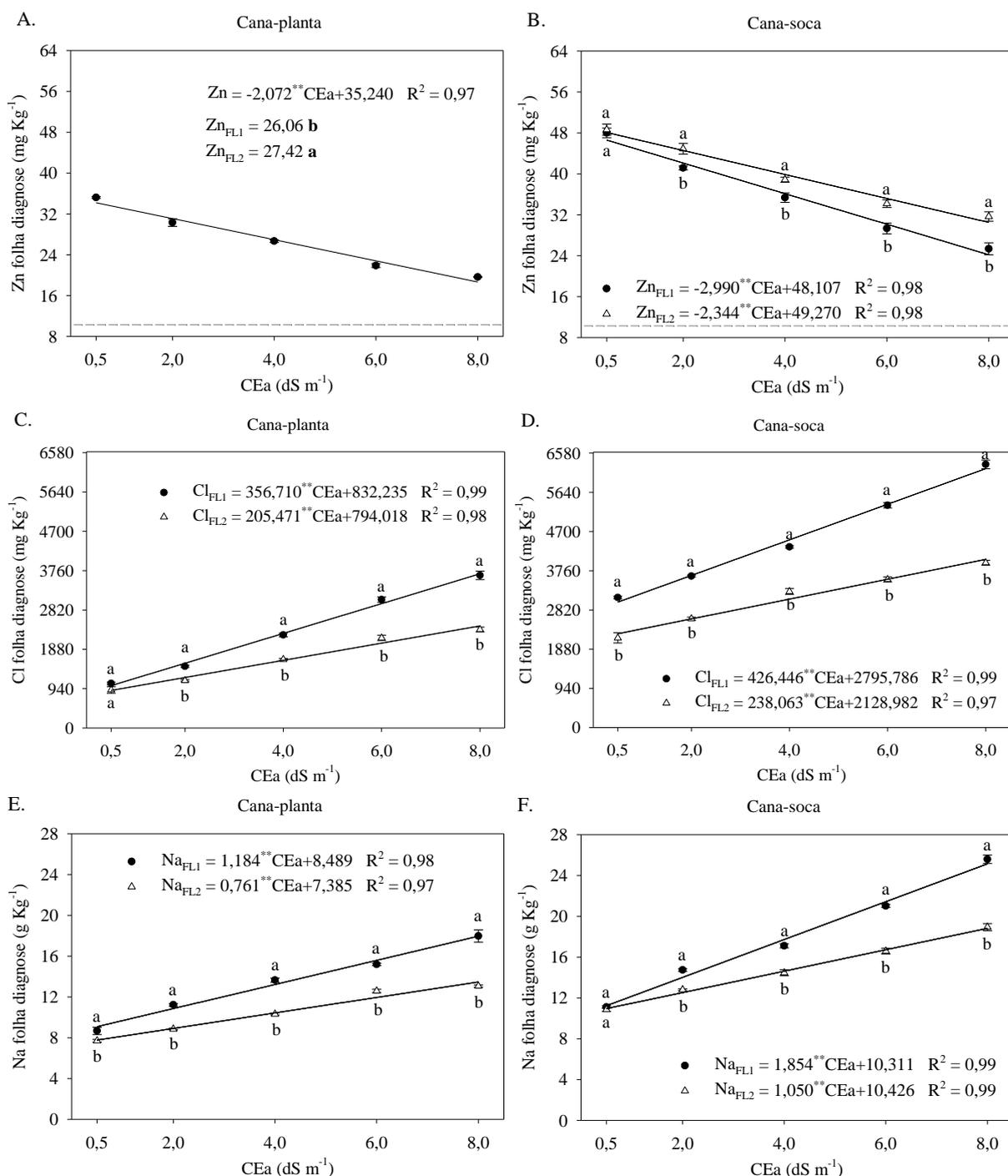
Na cana-planta, os teores foliares de Zn foram afetados de forma isolada pelos fatores salinidade e condições de lixiviação (Figura 5A). Para o fator salinidade, houve decréscimo de $2,072 \text{ mg Kg}^{-1}$ de massa seca para cada incremento unitário de salinidade da água de irrigação, uma redução de 45,43% na salinidade de $8,0 \text{ dS m}^{-1}$ quando comparada ao teor foliar de Zn das plantas irrigadas com água de abastecimento. Para o fator condições de lixiviação, nas plantas irrigadas com fração de lixiviação (FL2) o teor de Zn foi 5,26% maior do que na condição sem lixiviação (FL1). De acordo com

Cavalcanti et al. (2008), o teor foliar de zinco na cana-de-açúcar é de 10 mg Kg⁻¹, sendo os valores observados no presente estudo bem mais elevados. No entanto, trabalhos anteriores realizados por Malavolta et al. (1997), recomendam uma faixa de 25-50 mg Kg⁻¹ para a cultura, levando em consideração o limite inferior dessa faixa o teor de Zn encontrado no presente estudo foi considerado como adequado até a salinidade de 4,94 dS m⁻¹.

Na cana-soca (Figura 5B), houve efeito significativo da interação entre os fatores salinidade e condições de lixiviação ($p \leq 0,01$) para os teores de zinco. Os decréscimos unitários promovidos pelo aumento da salinidade foram de 2,990 (FL1) e 2,344 mg Kg⁻¹ (FL2), sendo obtidas reduções de 48,11 e 36,55% para as respectivas condições de lixiviação. Considerando os estudos realizados por Malavolta et al. (1997), os teores foliares de zinco no segundo ciclo encontraram-se adequados. Segundo Taiz et al. (2017) o zinco é essencial para vários processos bioquímicos na planta, tais como síntese de citocromo e nucleotídeo, metabolismo de auxina, produção de clorofila e manutenção das membranas. Na cana-de-açúcar sua deficiência é caracterizada pela redução do crescimento dos entrenós.

Assim como observado para o cálcio, o aumento dos níveis de salinidade também promovera aumentos nos teores foliares de cloro (Figura 5C e D) e sódio (Figura 5E e F). Houve acréscimos nos teores foliares do Cl na cana-planta (Figura 5C) de 356,710 e 205,471 mg Kg⁻¹ dS m⁻¹ nas condições sem e com fração de lixiviação, respectivamente. Para FL1 foram observados valores médios dos teores de Cl de 1010,59 e 3685,92 mg Kg⁻¹ (+264,73%) na condição sem lixiviação e 896,75 e 2437,79 mg Kg⁻¹ (+171,85%) com lixiviação, nas salinidades de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente.

Não se encontra relatos na literatura do teor foliar de cloreto ideal para cultura da cana-de-açúcar, no entanto, segundo Malavolta et al. (1997) as plantas de um modo geral apresentam ótimo crescimento na faixa de 340-2200 mg Kg⁻¹. Ainda de acordo com os autores altas concentrações nas plantas, podem causar toxidez a qual pode ser observada por meio de queima das pontas e margens das folhas, bronzeamento, amarelecimento precoce e abscisão das folhas; além disso, tem efeito competitivo com NO₃⁻ e SO₄²⁻. Tendo como base o limite superior da faixa citada, no presente estudo foram observados teores mais elevados nas folhas das plantas irrigadas com salinidades maiores que 3,83 (FL1) e 6,84 dS m⁻¹ (FL2).



** , * - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. Valores com letras diferentes indicam diferença significativa ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey nas condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.

---- Teor de Zn considerado adequado (análise da folha +3) segundo Cavalcanti et al. (2008).

Figura 5. Teores de Zinco (Zn) (A e B), Cloreto (Cl) (C e D), Sódio (Na) (E e F) na cana-planta e soca, respectivamente, submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.

Na cana-soca (Figura 5D) foram observados teores foliares de cloreto ainda mais elevados com o aumento da salinidade da água de irrigação. Na condição FL1, os valores médios teor de Cl foram 3009,01 e 6207,35 mg Kg⁻¹ (+106,29%) e na FL2 teores 2248,01 e 4033,49 mg Kg⁻¹ (-79,42%), para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente. Em estudos realizados por Lira et al. (2019) para variedade RB867515 (cana-planta) obtiveram aumentos de 158,84% (FL1 = 0) e 61,65% (FL2 = 0,17) em plantas irrigadas com CEa = 6,5 dS m⁻¹, quando comparada aquelas irrigadas com água de abastecimento (0,5 dS m⁻¹); os teores obtidos pelos autores para a salinidade de 6,5 dS m⁻¹ foram de 2902,62 e 1812,40 mg Kg⁻¹, para as respectivas condições de lixiviação.

Na cana-planta, os teores foliares de sódio (Figura 5E) para as salinidades de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹ foram de 9,08 e 17,96 g Kg⁻¹ (FL1) e 7,77 e 13,47 g Kg⁻¹ (FL2), aumentos percentuais de 97,79 e 73,50%, para as respectivas condições de lixiviação. A cana-soca (Figura 5F) apresentou aumentos percentuais semelhantes, no entanto, os teores foliares encontrados do íon foram mais elevados. Os resultados da presente pesquisa, corroboram com os estudos de Lira et al. (2019), os quais encontraram valores de até 14,49 g Kg⁻¹ na variedade RB867515 irrigada com águas salobras (CEa = 0,5; 2,0; 3,5; 5,0 e 6,5 dS m⁻¹) e sem fração de lixiviação.

Segundo Taiz et al. (2017), sob condições não salinas, o citosol de células de plantas superiores contém cerca de 10 mM de sódio (Na⁺), no entanto, em ambientes salinos, quando os níveis citosólicos de Na⁺ superam 100 mM, esse íon se torna citotóxico causando desnaturação de proteínas e desestabilização de membranas, pela redução da hidratação dessas macromoléculas. Os principais sintomas de toxicidade de sódio aparecem em forma de queimaduras ou necrose, ao longo das bordas.

As variações nos teores foliares dos macronutrientes, micronutrientes e do sódio indicam que o nível de estresse salino imposto variou não apenas com a salinidade da água e com a fração de lixiviação, mas também com a variação das condições ambientais na cana-planta e cana-soca, principalmente com a ocorrência de chuvas. Essa constatação reforça a importância de ensaios de campo especialmente com culturas perenes ou de ciclos longos, como é o caso da cana de açúcar.

Além disso, ficou evidente a importância do uso da fração de lixiviação (FL2 = 0,17) associada a um eficiente sistema de drenagem na remoção de alguns dos sais da zona radicular da cana-de-açúcar reduzindo o desequilíbrio nutricional causado pela salinidade da água de irrigação.

3.2. Análise nutricional (exportação e extração de macronutrientes, micronutrientes e sódio)

Pela análise de variância (Tabela 2) verificou-se efeito significativo da interação entre condutividade elétrica da água de irrigação e as condições sem e com lixiviação para todos os nutrientes avaliados e para o sódio na cultura da cana-de-açúcar RB92579 nos dois ciclos de cultivo (cana-planta e cana-soca) ($p \leq 0,05$).

Tabela 2. Resumo da análise de variância para extração de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), cloreto (Cl) e sódio (Na) em cana-planta e cana-soca sob diferentes níveis de salinidade da água de irrigação e condições de lixiviação

Cana-planta							
Quadrado médio							
Fonte de variação	GL	Macronutrientes					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Fração (FL)	1	9179,68**	1208,13**	10777,76**	3874,99**	1620,52**	1172,23**
Salinidade (CEa)	4	9134,36**	756,10**	6902,42**	6771,66**	1832,13**	967,35**
FL x CEa	4	159,67**	31,26**	66,37**	69,89**	59,77**	27,83**
Resíduo	30	328,36	1,53	10,01	5,99	2,14	1,50
CV	%	10,39	6,16	6,33	4,55	5,88	3,82
Fonte de variação	GL	Micronutrientes					Sódio
		Cu	Fe	Mn	Zn	Cl	Na
Fração (FL)	1	0,06**	7,98**	7,90**	0,21**	2,65**	9,14**
Salinidade (CEa)	4	0,23**	12,32**	7,30**	0,39**	1,37**	8,68**
FL x CEa	4	0,00**	0,25**	0,05*	0,00**	0,07**	0,26**
Resíduo	30	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00
CV	%	4,60	3,41	3,34	2,85	2,64	3,24
Cana-soca							
Quadrado médio							
Fonte de variação	GL	Macronutrientes					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Fração (FL)	1	14718,73**	1605,28**	9540,06**	4330,97**	3215,20**	1051,54**
Salinidade (CEa)	4	15451,15**	1001,92**	9783,25**	6669,83**	2059,88**	1074,14**
FL x CEa	4	232,88**	42,42**	150,97**	12,61**	36,19**	25,18**
Resíduo	30	10,35	0,94	10,04	10,02	2,42	1,16
CV	%	12,35	7,69	8,56	5,66	4,27	3,07
Fonte de variação	GL	Micronutrientes					Sódio
		Cu	Fe	Mn	Zn	Cl	Na
Fração (FL)	1	0,44**	22,15**	10,59**	0,81**	1,85**	12,38**
Salinidade (CEa)	4	0,31**	16,78**	8,86**	0,51**	4,95**	13,81**
FL x CEa	4	0,01**	0,20**	0,12**	0,02**	0,11**	1,07**
Resíduo	30	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00
CV	%	2,79	3,20	3,99	3,89	2,00	3,42

** , * - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e ^{ns} - não significativo, pelo teste F.

*Extração: acúmulo total de nutrientes no colmo + ponteira + folhas.

Na Tabela 3, pode-se observar as quantidades de nutrientes e de sódio extraídas pela cana-planta em função dos níveis de salinidade da água de irrigação e das condições sem (FL1) e com fração de lixiviação (FL2). As condições sem (FL1 = 0) e com fração de lixiviação (FL2 = 0,17) diferiram tanto nas quantidades extraídas como na ordem de extração de nutrientes. Com exceção do Ca, Cl e do Na, as maiores extrações de N, P, K, Mg, S, Fe, Mn, Cu e Zn foram observadas nos tratamentos com uso da fração de lixiviação (FL2).

A condição FL1 apresentou a seguinte ordem decrescente de extração: $N > K > Ca > Mg > P > S > Fe > Mn > Cl > Na > Zn > Cu$. Já com a FL2, a extração obedeceu a seguinte ordem decrescente: $N > K > Mg > Ca > P > S > Fe > Mn > Cl > Na > Zn > Cu$.

Orlando Filho et al. (1983) avaliando as variedades Co419 e CB41-76 em diferentes tipos de solos em São Paulo sob regime de sequeiro, observaram a seguinte ordem decrescente de extração de nutrientes: $K > N > Ca > Mg > S > P > Fe > Mn > Zn > Cu$, semelhante ao observado no presente estudo para a condição sem fração de lixiviação. Sob condições irrigadas com águas salobras (CEa: 0,5; 2,0; 3,5; 5,0 e 6,5 dS m^{-1}) e sem (FL = 0) e com fração de lixiviação (FL = 0,17) em Recife - PE, Lira et al. (2019) avaliaram a extração de macronutrientes e observaram a seguinte ordem decrescente para a RB867515: $K > Ca > N > Mg > S > P$. Pode-se destacar diante de tais resultados, que a ordem de extração de nutrientes pela cana-de-açúcar também é influenciada pelo manejo de água e solo.

Tabela 3. Extração de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), cloreto (Cl) e sódio (Na) em cana-planta sob diferentes níveis de salinidade da água de irrigação e condições de lixiviação

Cana-planta												
Macronutrientes												
CEa (dS m ⁻¹)	N		P		K		Ca		Mg		S	
	Ext.(FL1)	Ext.(FL2)	Ext.(FL1)	Ext.(FL2)	Ext.(FL1)	Ext.(FL2)	Ext.(FL1)	Ext.(FL2)	Ext.(FL1)	Ext.(FL2)	Ext.(FL1)	Ext.(FL2)
----- Kg ha ⁻¹ -----												
0,5	183,51	203,46	38,73	54,24	146,45	184,52	77,51	64,39	64,38	83,48	37,80	52,31
2,0	164,51	188,78	34,92	48,55	132,93	168,81	93,29	77,43	58,28	74,73	33,16	46,13
4,0	139,19	169,20	29,84	40,96	114,89	147,86	114,32	94,81	50,16	63,07	26,97	37,90
6,0	113,86	149,62	24,76	33,36	96,86	126,92	135,35	112,20	42,03	51,40	20,78	29,66
8,0	88,54	130,03	19,68	25,77	78,82	105,97	156,39	129,58	33,91	39,74	14,59	21,42
Média	137,92	168,22	29,59	40,58	113,99	146,82	115,37	95,68	49,75	62,48	26,66	37,48
CV	24,70	15,66	23,11	25,17	21,29	19,20	24,53	24,44	21,97	25,11	31,24	29,57
Eq.(FL1)	N = -12,663**CEa+189,84 R ² = 0,99		P = -2,541**CEa+40,00 R ² = 0,96		K = -9,018**CEa+150,96 R ² = 0,98		Ca = 10,517**CEa+72,25 R ² = 0,98		Mg = -4,063**CEa+66,41 R ² = 0,96		S = -3,095**CEa+39,35 R ² = 0,99	
Eq.(FL2)	N = -9,791**CEa+208,36 R ² = 0,99		P = -3,796**CEa+56,14 R ² = 0,95		K = -10,474**CEa+189,76 R ² = 0,99		Ca = 8,691**CEa+60,05 R ² = 0,98		Mg = -5,831**CEa+86,39 R ² = 0,96		S = -4,119**CEa+54,37 R ² = 0,95	
Micronutrientes												
CEa (dS m ⁻¹)	Cu		Fe		Mn		Zn		Cl		Sódio Na	
	Exp.(FL1)	Exp.(FL2)	Exp.(FL1)	Exp.(FL2)	Exp.(FL1)	Exp.(FL2)	Exp.(FL1)	Exp.(FL2)	Exp.(FL1)	Exp.(FL2)	Exp.(FL1)	Exp.(FL2)
----- Kg ha ⁻¹ -----												
0,5	0,72	0,86	5,29	6,28	4,25	5,01	0,82	0,98	3,01	2,36	1,22	0,68
2,0	0,65	0,76	4,70	5,65	3,75	4,56	0,71	0,86	3,19	2,59	1,82	1,10
4,0	0,55	0,63	3,90	4,80	3,08	3,96	0,57	0,71	3,42	2,90	2,62	1,67
6,0	0,46	0,51	3,11	3,96	2,41	3,37	0,42	0,56	3,66	3,21	3,42	2,24
8,0	0,36	0,38	2,32	3,11	1,75	2,77	0,27	0,41	3,89	3,52	4,22	2,81
Média	0,55	0,63	3,87	4,76	3,05	3,93	0,56	0,71	3,43	2,92	2,66	1,70
CV	23,63	27,59	27,55	23,86	29,48	20,35	25,20	28,57	9,20	14,27	30,46	35,00
Eq.(FL1)	Cu = -0,0483*CEa+0,748 R ² = 0,96		Fe = -0,396**CEa+5,487 R ² = 0,99		Mn = -0,334**CEa+4,416 R ² = 0,99		Zn = -0,073*CEa+0,859 R ² = 0,96		Cl = 0,117*CEa+2,953 R ² = 0,93		Na = 0,399**CEa+1,019 R ² = 0,97	
Eq.(FL2)	Cu = -0,0643**CEa+0,891 R ² = 0,99		Fe = -0,422*CEa+6,489 R ² = 0,93		Mn = -0,298**CEa+5,155 R ² = 0,97		Zn = -0,075**CEa+1,013 R ² = 0,99		Cl = 0,155**CEa+2,285 R ² = 0,94		Na = 0,284**CEa+0,534 R ² = 0,96	

Para ambas as condições de lixiviação (FL1 e FL2), a extração de nutrientes e do sódio em função dos níveis de salinidade da água de irrigação ajustou-se ao modelo linear (Tabela 3). Na condição sem (FL1) e com fração de lixiviação (FL2) podem ser observadas reduções na extração de N de 51,75 e 36,09%, respectivamente, nos tratamentos irrigados com salinidade de 8,0 dS m⁻¹ quando comparadas as plantas irrigadas com água de abastecimento (0,5 dS m⁻¹). Em média, as plantas dos tratamentos que receberam a fração de lixiviação extraíram 21,97% a mais de nitrogênio, corroborando com os resultados obtidos por Lira et al. (2019).

O N é um constituinte essencial de aminoácidos, ácidos nucleicos, nucleotídeos e clorofila, além de estar envolvido em processos enzimáticos (MALAVOLTA et al., 1997; RICHART & KOTZ, 2017). Segundo Prado et al. (2010), assume o papel principal no crescimento das plantas, perfilhamento e aumento do comprimento dos colmos da cana-de-açúcar, fazendo com que a parede celular fique mais delgada, diminuindo a porcentagem de fibra.

De maneira geral, observou-se que o acúmulo de N na parte aérea das plantas de cana-de-açúcar foi superior ao aporte de 60 kg ha⁻¹ de N incorporados ao solo via fertilizantes. Considerando os resultados encontrados por Oliveira et al. (1999), que constataram uma eficiência da adubação nitrogenada de plantio em torno de 50%, assim, estima-se que a quantidade efetiva acumulada na parte aérea da cana planta, proveniente do fertilizante, foi de cerca de 30 kg ha⁻¹. Segundo Vitti et al. (2007), pode ocorrer perdas no solo (lixiviação e desnitrificação) e na parte aérea das plantas na forma de NH₃ junto à corrente transpiratória, principalmente em folhas senescentes.

Esses resultados evidenciam que, as principais fontes de N para cana-planta são a mineralização da matéria orgânica do solo, a fixação do N atmosférico por microrganismos, a absorção de amônia da atmosfera, a absorção de nitrato pelas raízes mais profundas e a palha residual dos ciclos anteriores (OLIVEIRA et al., 2011; TAIZ et al., 2017).

Para P, as plantas irrigadas com a CEa = 8,0 dS m⁻¹ apresentaram reduções na extração de 49,20 (FL1) e 52,49% (FL2), quando comparada a CEa = 0,5 dS m⁻¹. Apesar da elevada redução observada na FL2 em função do aumento nos níveis de salinidade da água de irrigação, nessa condição a extração de P foi em média 37,15% maior do que os tratamentos da FL1. Lira et al. (2019), observaram para esse nutriente um aumento de 35,32% nas plantas irrigadas com a fração de lixiviação de 0,17.

O fósforo exerce funções de destaque na formação de proteínas e em vários processos, como a fotossíntese, divisão celular e armazenamento de energia, sendo um dos nutrientes mais limitantes na produção de cana-de-açúcar (SIMÕES NETO et al., 2009; GEBRIM et al., 2010).

Para extração de K, o maior nível de salinidade da água de irrigação ($8,0 \text{ dS m}^{-1}$) em relação a água de abastecimento ($0,5 \text{ dS m}^{-1}$) promoveu reduções percentuais de 46,18 e 42,57% para FL1 e FL2, respectivamente. Em média, nos tratamentos com fração de lixiviação houve uma maior extração (+28,80%) de potássio. Lira et al. (2019) também observaram um aumento médio na ordem de 22,85% para a extração de fósforo na variedade RB867515.

Assim como observado para os teores foliares, o aumento da salinidade da água de irrigação também promoveu incrementos nas quantidades totais extraídas de cálcio pelas plantas. Para ambas as condições de lixiviação os incrementos de Ca na salinidade de $8,0 \text{ dS m}^{-1}$ quando comparados aos tratamentos irrigados com água de abastecimento ficaram em torno de 100%, no entanto, de um modo geral a extração desse nutriente pelas plantas submetidas às condições sem lixiviação (FL1) foram 20,58% maior do que nos tratamentos com lixiviação.

No presente estudo, as altas concentrações de CaCl_2 na água de irrigação promoveram altas concentrações de Ca na solução do solo nos tratamentos sem uso da lixiviação. A FL1 corresponde a lâmina de 100% da ETc da cultura, assim, houve um acúmulo crescente de Ca no solo o que propicia uma maior absorção pelas raízes das plantas, daí a sua lixiviação ficou na dependência da ocorrência de precipitações pluviais.

Lira et al. (2019) não observaram diferenças significativas para as condições de lixiviação de 0 e 0,17 em relação ao cálcio, além disso, o aumento dos níveis de salinidade da água de irrigação promoveram reduções nas extrações de Ca pelas plantas, resultados avessos aos obtidos no presente estudo.

As reduções observadas para o Mg foram na ordem de 47,33 e 52,39%, para as condições sem e com fração de lixiviação, respectivamente, nas plantas irrigadas com a $\text{CEa} = 8,0 \text{ dS m}^{-1}$. A média de extração desse nutriente para os tratamentos com a fração de lixiviação 0,17 foi em média 25,59% maior do que no tratamento sem a lixiviação. Para o S também se observou reduções na extração com o aumento da salinidade na ordem de 61,41 e 59,06%, para FL1 e FL2, respectivamente. A média de extração de S nessa última condição foi 40,61% maior do que na condição sem lixiviação. Para este

nutriente, Lira et al. (2019) constataram diferenças significativas apenas para o fator salinidade da água de irrigação.

No presente estudo, a extração média observada para cada megagrama de matéria verde foi de 1,03 kg de N; 0,24 kg de P; 0,88 kg de K; 0,71 kg de Ca; 0,38 kg de Mg; 0,22 kg de S. Sob condições de sequeiro Orlando Filho (1983) relatam extrações pela cana-de-açúcar da ordem de 1,43 kg de N; 0,19 kg de P; 1,74 kg de K; 0,87 kg de Ca; 0,49 kg de Mg; 0,44 kg de S. Avaliando extração macronutrientes por 11 variedades de cana sob irrigação plena no município de Carpina - PE, Oliveira et al. (2010) obtiveram para cada megagrama de matéria verde produzida uma extração de 0,91 kg de N; 0,13 kg de P; 1,67 kg de K; 1,15 kg de Ca; 0,45 kg de Mg. Sob condições irrigadas com águas salobras, Lira et al. (2019) obtiveram para cada megagrama uma média de extração de 1,06 kg de N; 0,23 kg de P; 1,68 kg de K; 1,47 kg de Ca; 0,58 kg de Mg; 0,23 kg de S.

Para o cobre, foram observadas reduções na extração de 50,04 e 56,16%, para as condições sem (FL1) e com fração de lixiviação (FL2), respectivamente, nos tratamentos irrigados com salinidade de 8,0 dS m⁻¹ quando comparadas as plantas irrigadas com água de abastecimento (0,5 dS m⁻¹). Em média, as plantas dos tratamentos irrigados com a FL2 apresentaram uma extração cerca de 14,02% a mais desse micronutriente.

O incremento da salinidade da água de irrigação também promoveu reduções na extração de Fe pela plantas da cana-de-açúcar, sendo observadas reduções de 56,11 (FL1) e 50,41% (FL2), respectivamente, em média houve uma maior extração de Fe pelas plantas nos tratamentos irrigados com a FL2, ficando esse aumento em torno de 23,13%. Da mesma forma, as reduções na extração do Mn ficaram na ordem de 58,92 (FL1) e 44,59% (FL2). Para o Zn, foram observadas reduções percentuais de 66,70 e 57,61%, para as respectivas condições de lixiviação.

O aumento dos níveis de salinidade da água de irrigação promoveu aumentos na extração de cloreto e sódio, assim como foi observado para os teores foliares. Para extração de Cl, o maior nível de salinidade da água de irrigação (8,0 dS m⁻¹) promoveu aumentos percentuais de 29,23 e 49,17% para FL1 e FL2, respectivamente, quando comparadas as plantas irrigadas com água de abastecimento. Em média, nos tratamentos sem a fração de lixiviação apresentaram extração 17,62% a mais do que nos tratamentos com a fração de lixiviação.

Em relação ao Na, os aumentos foram ainda mais acentuados, sendo observadas aumentos nas extrações 245,82 e 315,25% para FL1 e FL2, respectivamente, no maior nível de salinidade da água de irrigação. Em média as plantas irrigadas com a FL1, apresentaram extração 56,30% a mais do que àquelas irrigadas com a FL2.

Não há relatos na literatura dos efeitos do estresse salino na extração de micronutrientes pela cana-de-açúcar. Segundo Dias et al. (2016) quando no extrato de saturação há teores elevados de sódio, o pH do solo poderá alcançar valores elevados e haver a diminuição na disponibilidade de zinco, cobre, manganês, ferro e boro, podendo ocorrer deficiência nas plantas cultivadas nessas condições.

No presente estudo, a extração média foi de 0,0040 kg de Cu; 0,0290 kg de Fe; 0,0235 kg de Mn; 0,0043 kg de Zn; 0,0147 kg de Na; 0,0214 kg de Cl. De acordo com Orlando Filho (1983), sob condições de sequeiro, a cana-de-açúcar extrai em média para cada megagrama de matéria verde cerca de 0,0034 kg de Cu; 0,0139 kg de Fe; 0,0105 kg de Mn; 0,0037 kg de Zn.

Na Tabela 4, pode-se observar que as quantidades médias de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn, Cl e Na extraídas pela cana-soca foram maiores do que àquelas extraídas pela cana-planta, o que pode ser explicado pelas maiores produtividades obtidas no segundo ciclo. Em média a cana-soca apresentou uma produção de massa verde da parte aérea 24,96% maior em relação ao primeiro ciclo (cana-planta), demandando assim, uma maior quantidade de nutrientes.

Apesar das maiores quantidades, o padrão de extração em função do aumento da salinidade da água de irrigação foi o mesmo observado na cana-planta, ou seja, com exceção Ca, Cl e do íon Na, os demais nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu e Zn) reduziram com o aumento dos níveis de salinidade. O uso da fração de lixiviação (FL2) promoveu maiores extrações de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu e Zn, e na condição sem fração de lixiviação (FL1) foram observadas maiores extrações de Ca, Cl e do Na.

Além disso, a cana-soca apresentou a mesma ordem de extração de nutrientes para as condições de lixiviação, independe dos níveis de salinidade da água de irrigação, ou seja, a FL1 apresentou a seguinte ordem decrescente de extração: N > K > Ca > Mg > P > S > Fe > Mn > Cl > Na > Zn > Cu; a FL2: N > K > Mg > Ca > P > S > Fe > Mn > Cl > Na > Zn > Cu.

De modo geral, a extração dos macronutrientes N, P, K, Ca, Mg e S pela cana-soca para as condições FL1 e FL2 foram maiores em 8,94 e 12,12%; 8,24 e 10,15%; 6,96 e 4,08%; 8,67 e 9,28%; 8,13 e 14,80%; 12,87 e 7,64%, respectivamente, do que as

observadas na cana-planta. Já para os micronutrientes os aumentos percentuais nas FL1 e FL2 foram de 12,51 e 32,08% (Cu), 12,13 e 22,36% (Fe), 12,41 e 13,22% (Mn), 14,52 e 31,41% (Zn), 3,34 e 6,73% (Cl) e para sódio o aumento foi de 18,51 e 19,74% (Na).

Tabela 4. Extração de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), cloreto (Cl) e sódio (Na) em cana-soca sob diferentes níveis de salinidade da água de irrigação e condições de lixiviação

Cana-soca												
Macronutrientes												
CEa (dS m ⁻¹)	N		P		K		Ca		Mg		S	
	Ext.(FL1)	Ext.(FL2)	Ext.(FL1)	Ext.(FL2)	Ext.(FL1)	Ext.(FL2)	Ext.(FL1)	Ext.(FL2)	Ext.(FL1)	Ext.(FL2)	Ext.(FL1)	Ext.(FL2)
Kg ha ⁻¹												
0,5	203,85	239,83	43,31	59,99	163,23	195,07	86,48	74,66	71,10	91,96	41,86	55,94
2,0	181,51	218,49	38,61	53,62	146,02	177,46	102,68	87,12	63,89	83,53	36,95	49,44
4,0	151,73	190,03	32,34	45,12	123,07	153,98	124,30	103,73	54,28	72,29	30,42	40,78
6,0	121,96	161,58	26,07	36,62	100,12	130,51	145,91	120,34	44,67	61,05	23,88	32,11
8,0	92,18	133,12	19,80	28,12	77,17	107,03	167,52	136,96	35,05	49,81	17,34	23,45
Média	150,25	188,61	32,02	44,69	121,92	152,81	125,38	104,56	53,80	71,73	30,09	40,34
CV	26,66	20,30	26,35	25,58	25,32	20,67	23,19	21,37	24,04	21,08	29,23	28,89
Eq. _(FL1)	N = -14,889**CEa+211,29 R ² = 0,97		P = -3,136*CEa+44,88 R ² = 0,91		K = -11,475**CEa+168,97 R ² = 0,97		Ca = 10,806**CEa+81,07 R ² = 0,96		Mg = -4,806*CEa+73,49 R ² = 0,89		S = -3,269*CEa+43,49 R ² = 0,93	
Eq. _(FL2)	N = -14,227**CEa+246,94 R ² = 0,98		P = -4,249**CEa+62,12 R ² = 0,99		K = -11,739**CEa+200,94 R ² = 0,98		Ca = 8,305**CEa+70,51 R ² = 0,99		Mg = -5,619**CEa+94,77 R ² = 0,98		S = -4,332**CEa+58,12 R ² = 0,98	
Micronutrientes												
CEa (dS m ⁻¹)	Cu		Fe		Mn		Zn		Cl		Sódio Na	
	Exp.(FL1)	Exp.(FL2)	Exp.(FL1)	Exp.(FL2)	Exp.(FL1)	Exp.(FL2)	Exp.(FL1)	Exp.(FL2)	Exp.(FL1)	Exp.(FL2)	Exp.(FL1)	Exp.(FL2)
Kg ha ⁻¹												
0,5	0,80	1,12	5,91	7,67	4,76	5,60	0,91	1,26	2,56	2,22	1,20	0,86
2,0	0,73	1,00	5,26	6,90	4,21	5,13	0,80	1,12	2,97	2,60	2,01	1,35
4,0	0,62	0,84	4,38	5,87	3,46	4,49	0,65	0,94	3,52	3,09	3,10	2,00
6,0	0,52	0,68	3,50	4,85	2,72	3,85	0,50	0,75	4,07	3,59	4,18	2,66
8,0	0,42	0,51	2,62	3,82	1,97	3,21	0,34	0,57	4,62	4,08	5,27	3,31
Média	0,62	0,83	4,33	5,82	3,43	4,45	0,64	0,93	3,55	3,12	3,15	2,04
CV	22,17	26,15	27,25	23,75	29,21	19,28	31,87	26,76	20,76	21,43	46,38	43,20
Eq. _(FL1)	Cu = -0,051**CEa+0,828 R ² = 0,97		Fe = -0,439**CEa+6,133 R ² = 0,95		Mn = -0,372*CEa+4,950 R ² = 0,94		Zn = -0,076*CEa+0,952 R ² = 0,88		Cl = 0,274**CEa+2,427 R ² = 0,96		Na = 0,543**CEa+0,924 R ² = 0,99	
Eq. _(FL2)	y = -0,0805x + 1,1584 R ² = 0,99		Fe = -0,514**CEa+7,931 R ² = 0,98		Mn = -0,319**CEa+5,763 R ² = 0,99		Zn = -0,092**CEa+1,305 R ² = 0,99		Cl = 0,248**CEa+2,099 R ² = 0,98		Na = 0,327*CEa+0,696 R ² = 0,93	

Na cana-soca, a extração média observada para cada megagrama de matéria verde foi de 0,91 kg de N; 0,21 kg de P; 0,74 kg de K; 0,62 kg de Ca; 0,34 kg de Mg; 0,19 kg de S; 0,0039 kg de Cu; 0,0274 kg de Fe; 0,0212 kg de Mn; 0,0042 kg de Zn; 0,0140 kg de Na; 0,0180 kg de Cl.

Pela análise de variância (Tabela 5) verificou-se que a interação entre condutividade elétrica da água de irrigação e as condições sem e com fração de lixiviação para todos os nutrientes e o íon sódio na cultura da cana-de-açúcar RB92579 na cana-planta e cana-soca ($p \leq 0,05$).

Tabela 5. Resumo da análise de variância para exportação de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), cloreto (Cl) e sódio (Na) em cana-planta e cana-soca sob diferentes níveis de salinidade da água de irrigação e condições de lixiviação

Cana-planta							
Quadrado médio							
Fonte de variação	GL	Macronutrientes					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Fração (FL)	1	8397,53**	349,99**	7022,23**	3418,98**	779,86**	295,44**
Salinidade (CEa)	4	4766,06**	362,70**	4633,81**	6229,74**	1450,38**	361,38**
FL x CEa	4	149,42**	9,71**	42,45**	68,62**	49,73**	5,24**
Resíduo	30	11,00	1,10	8,41	6,10	2,11	0,61
CV	%	9,56	4,28	6,45	8,13	3,02	3,62
Fonte de variação	GL	Micronutrientes					Sódio
		Cu	Fe	Mn	Zn	Cl	Na
Fração (FL)	1	0,02**	4,97**	4,52**	0,10**	1,36**	5,58**
Salinidade (CEa)	4	0,05**	3,55**	2,64**	0,15**	0,57**	4,91**
FL x CEa	4	0,00**	0,12*	0,01*	0,00**	0,07**	0,29*
Resíduo	30	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
CV	%	3,00	4,18	5,00	4,54	3,56	3,94
Cana-soca							
Quadrado médio							
Fonte de variação	GL	Macronutrientes					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Fração (FL)	1	12432,32**	473,75**	7249,01**	3375,48**	2199,88**	435,99**
Salinidade (CEa)	4	8326,82**	533,14**	6212,44**	4282,99**	1612,43**	549,62**
FL x CEa	4	255,98**	24,03**	229,87**	196,04**	28,32**	13,74**
Resíduo	30	8,17	0,55	6,91	8,32	2,20	0,80
CV	%	10,86	7,32	5,22	2,85	2,75	3,83
Fonte de variação	GL	Micronutrientes					Sódio
		Cu	Fe	Mn	Zn	Cl	Na
Fração (FL)	1	0,05**	7,01**	2,58**	0,13**	0,50**	5,69**
Salinidade (CEa)	4	0,09**	5,66**	2,71**	0,21**	1,39**	4,88**
FL x CEa	4	0,00**	0,11*	0,17**	0,01**	0,03**	0,34**
Resíduo	30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CV	%	3,11	2,90	2,52	1,07	2,56	3,76

** , * - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e ^{ns} - não significativo, pelo teste F.

*Exportação: acúmulo de nutrientes no colmo.

Na Tabela 6, pode-se observar as quantidades de nutrientes e de sódio exportadas pelos colmos da cana-planta em função dos níveis de salinidade da água de irrigação e condições sem (FL1) e com fração de lixiviação (FL2). O aumento dos níveis de salinidade promoveu redução na exportação N, P, K, Mg, S, Fe, Mn, Cu e Zn e aumento na exportação de Ca, Cl e Na pelos colmos da cana-de-açúcar.

A exportação obedeceu a seguinte ordem decrescente: FL1 (N > K > Ca > Mg > P > S > Fe > Mn > Cl > Na > Zn > Cu) e FL2 (N > K > Mg > Ca > P > S > Fe > Mn > Cl > Na > Zn > Cu). Orlando Filho et al. (1983) observaram a seguinte ordem decrescente de exportação de nutrientes em cana-de-açúcar sob condições de sequeiro: N > K > Ca > Mg > S > P > Fe > Mn > Zn > Cu, ordem semelhante a observada no presente estudo para a condição sem fração de lixiviação. Sob condições irrigadas com águas salobras, Lira et al. (2019) obtiveram para a exportação de macronutrientes a seguinte ordem decrescente para a RB867515: K > Ca > N > Mg > S > P.

As quantidades médias de macronutrientes alocadas no colmo, que corresponderam a efetivamente ao exportado pela variedade RB92579 representaram 78,65 e 81,71% (N), 72,99 e 67,80% (P), 81,74 e 81,51% (K), 90,65 e 89,97% (Ca), 88,01 e 84,22% (Mg), 71,12 e 64,97% (S) para as condições sem (FL1) e com fração de lixiviação (FL2), respectivamente, do total acumulado na parte aérea das plantas.

No trabalho de Lira et al. (2019) encontraram valores médios de exportação para as frações de 0 e 0,17 foram de a 69,78 e 77,31% (N), 66,25 e 72,49% (P), 74,96 e 74,20% (K), 79,14 e 78,87% (Ca), 58,87 e 64,09% (Mg) e 70,10 e 70,61% (S), respectivamente, do total acumulado na parte aérea, semelhante ao observado no presente estudo. Os estudos realizados por Orlando Filho et al. (1983), em regime de sequeiro, constataram valores médios de exportação de 58,04% (N), 57,89% (P), 44,82% (K), 54,02% (Ca), 67,34% (Mg) e 59,09% (S), valores esses mais baixos do que os obtidos no presente estudo.

Pode-se observar que, de maneira geral, as plantas sob estresse salino acumularam mais nutrientes nos colmos. A quantidade de nutrientes contida nos colmos não retorna para o solo, desse modo, sob condições de cultivo com águas salobras pode haver deficiência nutricional no solo ao longo dos ciclos de cultivo de forma mais rápida se o aporte de nutrientes via fertilizantes não for realizado de forma adequada.

Tabela 6. Exportação de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), cloreto (Cl) e sódio (Na) em cana-planta sob diferentes níveis de salinidade da água de irrigação e condições de lixiviação

Cana-planta												
Macronutrientes												
CEa (dS m ⁻¹)	N		P		K		Ca		Mg		S	
	Exp.(FL1)	Exp.(FL2)	Exp.(FL1)	Exp.(FL2)								
----- Kg ha ⁻¹ -----												
0,5	142,28	161,93	28,16	36,66	121,48	148,86	68,30	56,20	56,73	71,33	25,99	33,08
2,0	128,19	151,73	25,42	32,85	109,69	136,70	83,42	68,65	51,34	63,53	23,06	29,44
4,0	109,41	138,14	21,78	27,77	93,97	120,48	103,57	85,26	44,15	53,14	19,15	24,59
6,0	90,64	124,54	18,13	22,68	78,24	104,27	123,73	101,87	36,96	42,75	15,24	19,75
8,0	71,86	110,94	14,48	17,60	62,52	88,06	143,88	118,47	29,77	32,36	11,33	14,90
Média	108,48	137,46	21,59	27,51	93,18	119,67	104,58	86,09	43,79	52,62	18,96	24,35
CV	23,29	13,31	22,73	24,86	22,70	18,23	25,93	25,95	22,09	26,57	27,75	26,78
Eq.(FL1)	N = -9,389**CEa+146,97 R ² = 0,99		P = -1,824*CEa+29,07 R ² = 0,92		K = -7,86**CEa +125,41 R ² = 0,97		Ca = 10,078**CEa+63,26 R ² = 0,97		Mg = -3,595*CEa+58,53 R ² = 0,94		S = -1,965**CEa+26,97 R ² = 0,96	
Eq.(FL2)	N = -6,799**CEa+165,33 R ² = 0,98		P = -2,542**CEa+37,94 R ² = 0,96		K = -8,11**CEa +152,91 R ² = 0,99		Ca = 8,303**CEa+52,05 R ² = 0,98		Mg = -5,196**CEa+73,93 R ² = 0,97		S = -2,424**CEa+34,29 R ² = 0,95	
Micronutrientes												
CEa (dS m ⁻¹)	Cu		Fe		Mn		Zn		Cl		Sódio Na	
	Exp.(FL1)	Exp.(FL2)	Exp.(FL1)	Exp.(FL2)								
----- Kg ha ⁻¹ -----												
0,5	0,38	0,45	3,16	4,01	2,59	3,19	0,48	0,62	2,33	1,79	0,77	0,46
2,0	0,35	0,41	2,86	3,65	2,29	2,92	0,42	0,54	2,43	1,96	1,24	0,75
4,0	0,29	0,35	2,46	3,17	1,89	2,56	0,34	0,44	2,56	2,18	1,87	1,14
6,0	0,24	0,28	2,06	2,69	1,49	2,20	0,26	0,34	2,69	2,41	2,51	1,53
8,0	0,19	0,22	1,66	2,21	1,09	1,84	0,18	0,24	2,82	2,64	3,14	1,92
Média	0,29	0,34	2,44	3,15	1,87	2,54	0,34	0,44	2,56	2,19	1,91	1,16
CV	24,18	24,51	22,07	20,57	28,64	19,06	32,30	30,95	6,81	13,85	34,74	35,26
Eq.(FL1)	Cu = -0,026**CEa+0,398 R ² = 0,99		Fe = -0,200**CEa+3,264 R ² = 0,99		Mn = -0,199**CEa+2,687 R ² = 0,99		Zn = -0,041*CEa+0,503 R ² = 0,89		Cl = 0,065*CEa+2,297 R ² = 0,90		Na = 0,317*CEa+0,607 R ² = 0,95	
Eq.(FL2)	Cu = -0,031**CEa+0,471 R ² = 0,99		Fe = -0,241*CEa+4,133 R ² = 0,94		Mn = -0,180**CEa+3,281 R ² = 0,95		Zn = -0,050**CEa+0,644 R ² = 0,99		Cl = 0,113*CEa+1,732 R ² = 0,95		Na = 0,195*CEa+0,359 R ² = 0,96	

Na Tabela 7, observa-se as quantidades de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn, Cl e Na exportadas pelos colmos na cana-soca. Assim como a extração total de nutrientes pela cana-soca, a exportação também foi maior do que na cana-planta. Em média a cana-soca apresentou uma produção de massa verde de colmos 21,91% maior em relação ao primeiro ciclo (cana-planta), justificando as maiores quantidades exportadas.

O padrão de exportação em função do aumento da salinidade da água de irrigação foi o mesmo observado na cana-planta, ou seja, com exceção Ca, Cl e do Na, os demais nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu e Zn) reduziram com o aumento dos níveis de salinidade. O uso da fração de lixiviação (FL2) promoveu maiores exportações de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu e Zn, e na condição sem fração de lixiviação (FL1) foram observadas maiores exportações de Ca, Cl e do Na.

A cana-soca também apresentou a mesma ordem de exportação de nutrientes para as condições de lixiviação, independente dos níveis de salinidade da água de irrigação, ou seja, a FL1 apresentou a ordem decrescente de exportação $N > K > Ca > Mg > P > S > Fe > Mn > Cl > Na > Zn > Cu$ e para condição FL2 foi $N > K > Mg > Ca > P > S > Fe > Mn > Cl > Na > Zn > Cu$.

As exportações de macronutrientes pela cana-soca nas condições FL1 e FL2 foram maiores em 6,59 e 9,04% (N), 6,66 e 8,74% (P), 5,51 e 5,42% (K), 5,48 e 4,82% (Ca), 6,64 e 16,93% (Mg) e 6,54 e 10,06% (S), respectivamente, do que as observadas na cana-planta. Para os micronutrientes os aumentos percentuais nas respectivas condições de lixiviação foram 6,61 e 11,40% (Cu), 6,50 e 9,28% (Fe), 6,72 e 1,45% (Mn), 7,14 e 9,49% (Zn); para cloreto houve redução na exportação de 7,08 e 1,75% (Cl) e para sódio um aumento de 4,16 e 6,22% (Na).

Na cana-soca, a exportação média observada foi de 0,89 kg de N; 0,18 kg de P; 0,76 kg de K; 0,65 kg de Ca; 0,37 kg de Mg; 0,16 kg de S; 0,0023 kg de Cu; 0,0203 kg de Fe; 0,0152 kg de Mn; 0,0028 kg de Zn; 0,0108 kg de Na; 0,0153 kg de Cl para cada megagrama de matéria verde de colmos. Orlando Filho (1983) relatam extrações pela cana-de-açúcar da ordem de 0,83 kg de N; 0,11 kg de P; 0,78 kg de K; 0,47 kg de Ca; 0,33 kg de Mg; 0,26 kg de S, 0,0023 kg de Cu; 0,0139 kg de Fe; 0,0152 kg de Mn; 0,0037 kg de Zn.

Tabela 7. Exportação de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), cloreto (Cl) e sódio (Na) em cana-soca sob diferentes níveis de salinidade da água de irrigação e condições de lixiviação

Cana-soca												
Macronutrientes												
CEa (dS m ⁻¹)	N		P		K		Ca		Mg		S	
	Exp. _(FL1)	Exp. _(FL2)	Exp. _(FL1)	Exp. _(FL2)	Exp. _(FL1)	Exp. _(FL2)	Exp. _(FL1)	Exp. _(FL2)	Exp. _(FL1)	Exp. _(FL2)	Exp. _(FL1)	Exp. _(FL2)
----- Kg ha ⁻¹ -----												
0,5	156,22	186,19	31,00	41,15	133,30	158,69	76,57	56,18	62,43	79,08	28,57	37,92
2,0	139,30	171,06	27,68	36,47	119,11	145,14	90,63	66,92	55,87	71,77	25,08	33,29
4,0	116,75	150,89	23,25	30,23	100,19	127,06	109,38	81,22	47,13	62,02	20,43	27,11
6,0	94,19	130,71	18,83	23,99	81,27	108,99	128,12	95,53	38,40	52,27	15,78	20,93
8,0	71,64	110,54	14,40	17,75	62,35	90,92	146,86	109,84	29,66	42,51	11,12	14,75
Média	115,62	149,88	23,03	29,92	99,24	126,16	110,31	81,94	46,70	61,53	20,20	26,80
CV	26,25	18,11	25,86	28,06	25,65	19,27	22,86	23,49	25,18	21,32	31,00	31,01
Eq. _(FL1)	N = -11,278**CEa+161,86 R ² = 0,96		P = -2,2138*CEa+32,11 R ² = 0,87		K = -9,461*CEa+138,03 R ² = 0,96		Ca = 9,372*CEa+7189 R ² = 0,95		Mg = -4,369**CEa+64,61 R ² = 0,89		S = -2,327*CEa+29,74 R ² = 0,92	
Eq. _(FL2)	N = -10,086**CEa+192,23 R ² = 0,97		P = -3,120**CEa+42,71 R ² = 0,99		K = -9,0364*CEa+ 163,21 R ² = 0,95		Ca = 7,154**CEa+62,61 R ² = 0,99		Mg = -4,876**CEa+81,52 R ² = 0,98		S = -3,089**CEa+39,465 R ² = 0,98	
Micronutrientes												
CEa (dS m ⁻¹)	Cu		Fe		Mn		Zn		Cl		Sódio Na	
	Exp. _(FL1)	Exp. _(FL2)	Exp. _(FL1)	Exp. _(FL2)	Exp. _(FL1)	Exp. _(FL2)	Exp. _(FL1)	Exp. _(FL2)	Exp. _(FL1)	Exp. _(FL2)	Exp. _(FL1)	Exp. _(FL2)
----- Kg ha ⁻¹ -----												
0,5	0,42	0,53	3,47	4,57	2,84	3,04	0,53	0,70	1,85	1,69	0,84	0,56
2,0	0,38	0,47	3,11	4,10	2,49	2,82	0,46	0,61	2,07	1,89	1,32	0,84
4,0	0,31	0,39	2,63	3,47	2,02	2,52	0,37	0,48	2,37	2,14	1,95	1,21
6,0	0,25	0,30	2,14	2,84	1,55	2,22	0,27	0,36	2,66	2,40	2,59	1,58
8,0	0,19	0,22	1,66	2,21	1,08	1,93	0,18	0,24	2,96	2,66	3,23	1,95
Média	0,31	0,38	2,60	3,44	2,00	2,51	0,36	0,48	2,38	2,16	1,99	1,23
CV	27,02	29,96	24,95	24,61	31,61	15,96	35,44	33,95	16,73	16,00	43,25	40,53
Eq. _(FL1)	Cu = -0,031**CEa+ 0,437 R ² = 0,98		Fe = -0,241**CEa+3,590 R ² = 0,98		Mn = -0,235*CEa+2,958 R ² = 0,96		Zn = 0,048**CEa+0,557 R ² = 0,84		Cl = 0,148**CEa+1,775 R ² = 0,98		Na = 0,319*CEa+0,677 R ² = 0,95	
Eq. _(FL2)	Cu = -0,043**CEa+0,556 R ² = 0,99		Fe = -0,315**CEa+4,728 R ² = 0,98		Mn = -0,149**CEa+3,115 R ² = 0,94		Zn = 0,060**CEa+0,726 R ² = 0,99		Cl = 0,128*CEa+1,630 R ² = 0,94		Na = 0,185*CEa+0,471 R ² = 0,90	

3.3. Produção de biomassa (Massa verde da parte aérea e produtividade de colmos)

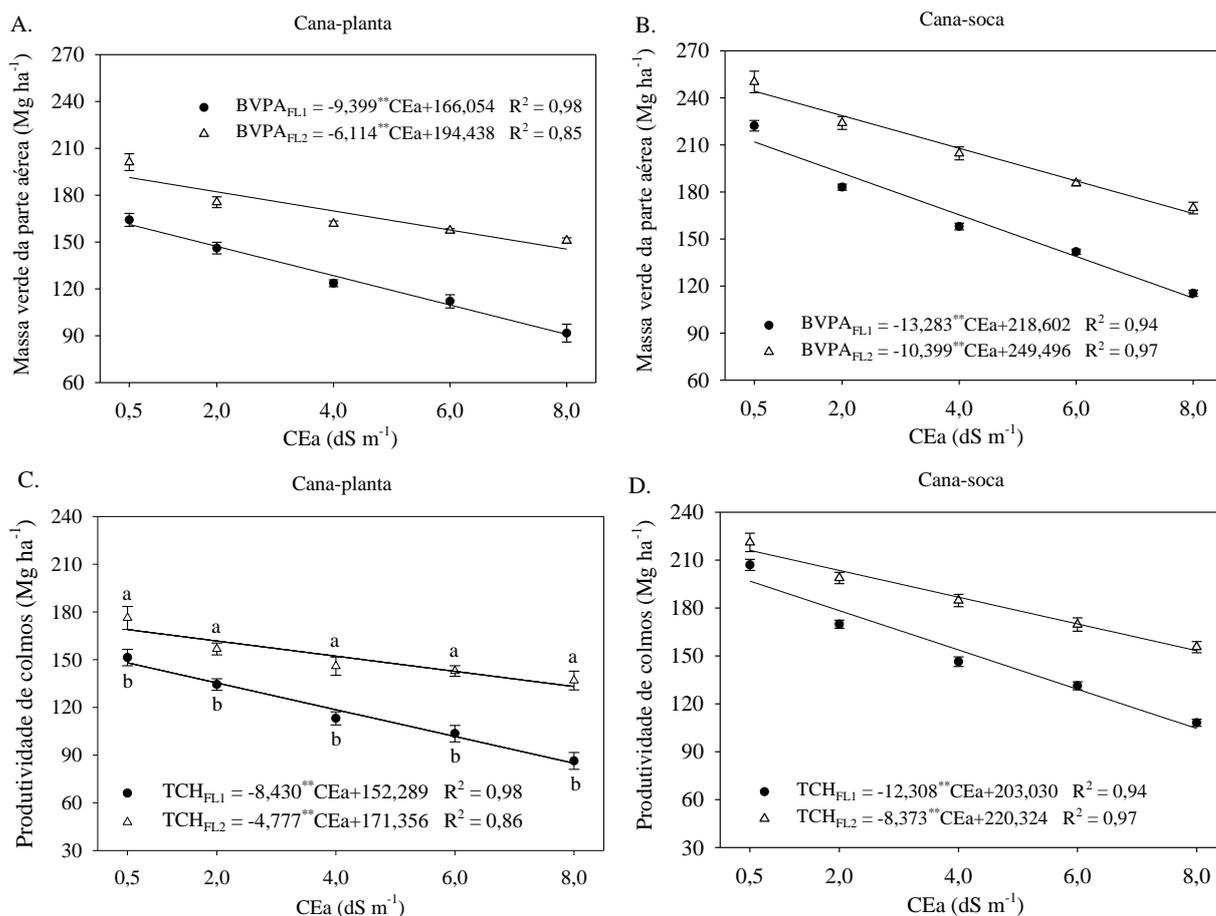
Verificou-se efeito significativo da interação entre condutividade elétrica da água de irrigação e as condições sem e com lixiviação sobre a produtividade de massa verde da parte aérea e colmos da cultura da cana-de-açúcar RB92579 nos dois ciclos de cultivo (cana-planta e cana-soca) ($p \leq 0,05$).

Na Figura 6A (cana-planta), observa-se decréscimos de 9,399 e 6,114 Mg ha⁻¹ de biomassa total da parte aérea (BVPA) para cada incremento unitário de salinidade para as condições sem (FL1) e com fração de lixiviação (FL2), respectivamente. Na condição FL1, os valores médios estimados pela equação de regressão de BVPA foram 161,35 e 90,86 Mg ha⁻¹ para os níveis de salinidade da água de irrigação de 0,5 e 8,0 dS m⁻¹, respectivamente, redução percentual de 43,7%, já na condição FL2 foram de 191,38 e 145,53 Mg ha⁻¹ (-23,9%). Em média o uso da fração de lixiviação apresentou uma produção de biomassa verde total 32,81% maior do que na condição sem fração de lixiviação.

Na cana-soca (Figura 6B), foram observadas reduções de produção de -47,0% (FL1) e -31,9% (FL2) na salinidade de 8,0 dS m⁻¹ quando comparada as plantas irrigadas com água de abastecimento (0,5 dS m⁻¹). O uso da fração de lixiviação promoveu uma produção de biomassa verde total em média 26,01% maior do que na condição sem fração de lixiviação.

Nos casos em que os níveis salinos são prejudiciais às plantas, o uso da fração de lixiviação é a chave para a irrigação bem sucedida, no entanto, o êxito dessa operação depende essencialmente da existência de um sistema de drenagem eficiente que remova a água lixiviada (PUGA et al., 2016; ZHANG et al., 2019). De acordo com Bernardo et al. (2019), a drenagem é necessária, mesmo nas regiões onde a ocorrência de chuvas dispensa a aplicação de uma lâmina de irrigação, para lixiviação de sais.

No segundo ciclo (cana-soca) foram observadas maiores lâminas de precipitação pluvial em relação a precipitação pluvial registrada no primeiro ciclo. Esse fato contribuiu para uma maior lixiviação dos sais do ambiente radicular das plantas, mitigando os efeitos deletérios dos sais.



******, ***** - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. Valores com letras diferentes indicam diferença significativa ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey nas condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.

Figura 6. Massa verde da parte aérea (A e B) e produtividade de colmos (C e D) na cana-planta e soca, respectivamente, submetida à salinidade da água de irrigação (CEa) e sob as condições sem (FL1) e com (FL2) fração de lixiviação.

Para o rendimento de colmos na cana-planta (Figura 6C), verificou-se decréscimos de 8,430 e 4,777 $Mg\ ha^{-1}$ por incremento unitário da salinidade da água de irrigação para FL1 e FL2, respectivamente. O maior rendimento de massa verde de colmos foi obtido quando se adotou a FL2 nas plantas irrigadas com a salinidade de 0,5 $dS\ m^{-1}$ (168,97 $Mg\ ha^{-1}$), enquanto que, no nível salino de 8,0 $dS\ m^{-1}$ para esta mesma condição a TCH foi de 133,14 $Mg\ ha^{-1}$ (-21,2%). Na condição FL1, os valores obtidos de TCH foram de 148,07 e 84,85 $Mg\ ha^{-1}$, para os respectivos níveis de salinidade da água de irrigação, redução de -42,7%. Em média, a produção de colmos na FL2 foi 28,91% maior do que na condição FL1.

Na cana-soca (Figura 6D), foram obtidos rendimentos bastante expressivos, sendo na condição FL1, valores médios 196,88 e 104,57 $Mg\ ha^{-1}$ (-46,9%) para as salinidades de 0,5 e 8,0 $dS\ m^{-1}$, respectivamente, já com a FL2 as produtividades de

colmos para os respectivos níveis de salinidade foram 216,13 e 153,34 Mg ha⁻¹, redução percentual de 29,1. Com uso da fração de lixiviação (FL2), a produção de colmos foi em média 21,91% maior do que na condição sem lixiviação.

Estudo realizado com Lira et al. (2018) em Recife, PE com a variedade RB867515 sob irrigação com águas salobras (CEa = 0,5; 2,0; 3,5; 5,0 e 6,5 dS m⁻¹) e as condições sem (FL = 0) e com fração de lixiviação (FL = 0,17) observaram uma redução média na ordem de 28,64% na produtividade de colmos, sendo o maior rendimento (116,60 Mg ha⁻¹) obtido no menor nível de salinidade. Ainda de acordo com os autores, não houve efeito significativo do fator condições de lixiviação para a produção de colmos.

4. CONCLUSÕES

O incremento da salinidade da água de irrigação reduziu os teores foliares de N, P, K, Mg, S, Fe, Mn, Cu e Zn e aumentou os teores de Ca, Cl e Na para ambos os ciclos de cultivo (cana-planta e soca).

Os efeitos da salinidade nos teores foliares dos macronutrientes, micronutrientes e sódio foram minimizados pelo uso da fração de lixiviação (0,17).

Com exceção do Ca, Cl e Na, a extração e exportação de nutrientes foram afetadas negativamente com o incremento da salinidade da água de irrigação na cana-planta e soca.

A extração e a exportação de nutrientes e de sódio pela variedade RB92579 em ambos os ciclos de cultivo ocorreu na seguinte ordem para a condição sem lixiviação (0): N > K > Ca > Mg > P > S > Fe > Mn > Cl > Na > Zn > Cu; com fração de lixiviação (0,17): N > K > Mg > Ca > P > S > Fe > Mn > Cl > Na > Zn > Cu.

O uso da fração de lixiviação (0,17) promoveu maiores extrações e exportações dos macronutrientes e micronutrientes pela cultura em ambos os ciclos de cultivo e menores de Ca, Cl e Na.

A produção de biomassa: massa verde da parte aérea e produtividade dos colmos foi afetada negativamente pelo aumento da salinidade da água de irrigação, sendo este efeito atenuado pelo uso da fração de lixiviação (0,17).

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, P. S.; RAES, R.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. 2.ed. Campina Grande: UFPB, 1999. 153p. FAO. Estudos de Irrigação e Drenagem, 29 revisado 1.

BASTOS, A. L.; COSTA, J. P. V.; SILVA, I. F.; RAPOSO, R. W. C.; SOUTO, J. S. Influência de doses de fósforo no fluxo difusivo em solos de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.2, p.136-142, 2008.

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

BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L. P. **Análises químicas e bioquímicas em plantas**. Recife: UFRPE, Editora Universitária da UFRPE, 2011. 267p.

CAVALCANTI, F. J. A.; SANTOS, J. C. P.; PEREIRA, J. R.; LEITE, J. P.; SILVA, M. C. L.; FREIRE, F. J.; SILVA, D. J.; SOUSA, A. R.; MESSIAS, A. S.; FARIA, C. M. B.; BURGOS, N.; LIMA JÚNIOR, M. A.; GOMES, R. V.; CAVALCANTI, A. C.; LIMA, J. F. W. F. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco**. 2.ed. Recife: Instituto Agrônomo de Pernambuco, 2008. 198p.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar**. v.6 - safra 2019/2020 - Terceiro levantamento. Brasília, 2019. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana> >. Acesso em: 26 ago. 2019.

COSTA, D. M. A.; MELO, H. N. S.; FERREIRA, S. R.; DANTAS, J. A. Conteúdo de N, P, K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ no amaranto (*Amaranthus* spp) sob estresse salino e cobertura morta. **Revista Ciência Agrônômica**, v.39, n.2, p.209-216, 2008.

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

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

DOORENBOS, J.Y; PRUITT, W.O. **Crop water requirements**. FAO Estudio de Riego y Drenaje, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, n.24, 1977. 144p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2011. 212p.

GANDONOU, C.B.; BADA, F.; GNANCADJA, S.L.; ABRINI, J.; SKALI-SENHAJI, N. Effects of NaCl on Na⁺, Cl⁻ and K⁺ ions accumulation in two sugarcane (*Saccharum sp.*) cultivars differing in their salt tolerance. **International Journal of Plant Physiology and Biochemistry**, v.3, n.10, p.155-162, 2011.

GEBRIM, F. O.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R. S.; SCHULTHAIS, F.; VERGUTZ, L.; PROCÓPIO, L. C.; MOREIRA, F. F.; JESUS, G. L. Mobility of inorganic and organic phosphorus forms under different levels of phosphate and poultry litter fertilization in soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.4, p.1195-1205, 2010.

GHODRATI, M.; GHAZARYAN, S. Agriculture water supply in semi-arid zone by underground dams. **European Journal of Experimental Biology**, v.3, n.3, p.706-711, 2013.

HANIN, M.; EBEL, C.; NGOM, M.; LAPLAZE, L.; MASMOUDI, K. New insights on plant salt tolerance mechanisms and their potential use for breeding. **Frontiers in Plant Science**, v.7, n.1787, 2016.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produto Interno Bruto 2018**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php>>. Acesso em: 22 dez. 2018.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Normal Climatológica do Brasil**: 1981-2010. Disponível

em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologica>>. Acesso em: 04 jun. 2019.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Avibook, 1990. 649 p.

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, n.3, p.192-202, 2016.

LIRA, R. M.; SILVA, Ê. F. F.; SILVA, G. F.; SANTOS, A. N.; ROLIM, M. M. Production, water consumption and nutrient content of Chinese cabbage grown hydroponically in brackish water. **Revista Ciência Agronômica**, v.46, n.3, p.497-505, 2015.

LIRA, R. M.; SILVA, E. F. F.; SILVA, G. F.; SOUZA, D. H.; PEDROSA, E. M. R.; GORDIN, L. C. Content, extraction and export of nutrients in sugarcane under salinity and leaching fraction. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, n.6, p.432-438, 2019.

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

MAQBOOL, N.; WAHID, A.; SHAHZAD, M.A. Basra Varied Patterns of Sprouting and Nutrient Status of Sugarcane Sprouts in Simulated and Natural Saline/Sodic Soils Across two Growing Seasons. **International journal of agriculture & biology**, v.18, n.4, p.873-880, 2016.

MANSOUR, M. M. F. The plasma membrane transport systems and adaptation to salinity. **Journal of Plant Physiology**, v.171, n.1, p.1787-1800, 2014.

MARIN, F.; NASSIF, D. S. P. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: fisiologia, conjuntura e cenário futuro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.2, p.232-239, 2013.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, v.59, n. 1, p.651-681, 2008.

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I.; FREIRE, M. B. G. S.; SIMÕES NETO, D. E.; SILVA, S. A. M. Extração de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.4, p.1343-1352, 2010.

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, J. F.; OLIVEIRA, R. I.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, M. B. G. S. Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, v.42, n.3, p.579-588, 2011.

OLIVEIRA, M. W.; TRIVELIN, P. C. O.; PENATTI, C. P.; PICCOLO, M. C. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.12, p.2359-2362, 1999.

ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: USP-FEALQ, 1983. 369p.

PRADO, R. M.; FRANCO, C. F.; PUGA, A. P. Macronutrient deficiencies in soybean cv. BRSMG 68 (Vencedora) cultivated in nutritive solution. **Comunicata Scientiae**, v.1, n.2, p.114-119, 2010.

PUGA, A. P.; MELO, L. C. A.; ABREU, C. A.; COSCIONE, A. R.; PAZ-FERREIRO, J. Leaching and fractionation of heavy metals in mining soils amended with biochar. **Soil & Tillage Research**, v.164, n.1, p.25-33, 2016.

RICHART, A.; KOTZ, H. S. Sintomas de deficiências nutricionais em culturas. **In**: VIECELLI, C. A. (Org.). Guia de deficiências nutricionais em plantas. 1.ed. Toledo, PR: PUCPR Câmpus Toledo/Grupo Marista. 2017. Cap. 1, p.5-49.

RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: USDA, 1954. 60 p. Handbook, 60.

RODOLFO JUNIOR, F.; RIBEIRO JUNIOR, W. Q.; RAMOS, M. L. G.; ROCHA, O. C.; BATISTA, L. M. T.; SILVA, F. A. M. Produtividade e qualidade de variedades de cana-de-açúcar de terceira soca sob regime hídrico variável. **Nativa**, v.4, n.1, p.36-43, 2016.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353p.

SANTOS, R. V.; CAVALCANTE, L. F.; VITAL, A. F. M.; LACERDA, C. F.; SOUZA, E. R.; LIMA, G. S. Interação salinidade-fertilidade do solo. **In:** GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; FILHO, E. G. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. 2.ed., Fortaleza, INCT Sal, 2016. Cap.18, p.278-293.

SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; NASCIMENTO, C. W. A.; ROCHA, A. T. Extração de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar e suas relações com a capacidade tampão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.1, p.840-848, 2009.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2.ed. rev. ampli. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12.ed. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2014. 372p.

STATSOFT. Inc. **STATISTICA**: Data Analysis Software System, version 10.0. 2010.

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

VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. C.; FRANCO, H. C. J.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada à localização de adubos nitrogenados aplicados sobre os resíduos culturais em canavial sem queima. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.3, p.491-498, 2007.

ZHANG, C.; LIA, X.; KANGA, Y.; WANG, X. Salt leaching and response of *Dianthus chinensis* L. to saline water dripirrigation in two coastal saline soils. **Agricultural Water Management**, v.218, n.1, p.8-16, 2019.