

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA**

BRUNO JOSÉ ZANCHIM

Eficiência de uso de potássio e de água em genótipos de cana-de-açúcar

Piracicaba

2015

Bruno José Zanchim

Eficiência de uso de potássio e de água em genótipos de cana-de-açúcar

Versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Dissertação apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Biologia na Agricultura e no Ambiente

Orientador: Prof. Dr. José Lavres Junior

Piracicaba

2015

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Seção Técnica de Biblioteca – CENA/USP

Zanchim, Bruno José

Eficiência de uso de potássio e de água em genótipos de cana-de-açúcar / Bruno José Zanchim; orientador José Lavres Junior. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2015.

115 p. : il.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Biologia na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo.

1. Estresse hídrico 2. Fotossíntese 3. Nutrição vegetal 4. Plantas produtoras de açúcar I. Título

CDU 631.811 : 633.61

Aos meus pais Sérgio Carlos Zanchim e Vera Lúcia José Zanchim, ao meu irmão Thiago José Zanchim, aos familiares e aos amigos, pelo apoio, oportunidade de estudo, dedicação e incentivo.

OFEREÇO E DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus e à Nossa Senhora pela vida e por iluminar todos os caminhos por onde passei.

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA/USP, por me acolher e fornecer a infraestrutura necessária para a realização da respectiva pesquisa.

Ao Professor José Lavres Junior pela orientação, valiosos ensinamentos, pelo grande exemplo de dedicação, profissionalismo e confiança no meu trabalho.

Aos Professores Lionel Jordan Meille e Jean-Cristophe Domec e a doutoranda Elsa Martineau da *Université de Bordeaux – Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agronomiques de Bordeaux - Aquitaine* pela acolhida, ensinamentos e apoio em minha estadia na França.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela bolsa de estudos concedida.

À Bióloga Cleusa Cabral, pela amizade, conselhos e paciência nas análises laboratoriais.

Aos amigos do laboratório de Nutrição Mineral de Plantas do CENA: Aline Grella de Campos, Dr^a. Cristiane Prezotto Silveira, Elcio Ferreira dos Santos, Fabiana Manarelli, Felipe Furlan, Fernando Giovannetti de Macedo, Flávio Henrique Rabêlo, Joaquim José Frazão, Luiz Tadeu Jordão, Nicolas Braga Casarin, Raphael Florencio Garrone e Riviane Maria de Albuquerque Donha.

Aos colegas Dr. Eduardo de Andrade Bressan, Naiara Celida dos Santos de Souza e Jamille Santos da Silva que mesmo de outros laboratórios me aconselharam durante o experimento.

Aos técnicos Aparecida de Fátima Patreze, Dr. Enio Tiago Borges e M.Sc. Mariana Belloti pelo auxílio e paciência durante as análises.

À Biblioteca do CENA e a Sra. Marília Ribeiro Garcia Henyei pela ajuda e revisão das normas técnicas.

Aos funcionários do CENA pela pronta colaboração.

A Família Perdição por me proporcionar os melhores anos de minha vida durante a graduação e mestrado.

E a todos que colaboraram, direta ou indiretamente, para a realização desse trabalho.

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita ou não faz.”

Airton Senna da Silva

RESUMO

ZANCHIM, B. J. **Eficiência de uso de potássio e de água em genótipos de cana-de-açúcar.** 2015. 115 p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

A cana-de-açúcar apresenta acentuada variação genotípica relacionada à eficiência de uso dos nutrientes, sendo que a abordagem desse assunto em pesquisas científicas prioriza os estudos relacionados ao nitrogênio (N) e fósforo (P). Porém, devido a essencialidade do potássio (K) como nutriente pela função exercida nas relações hídricas das plantas e sua importância na economia brasileira, pesquisas relacionadas à eficiência de uso de K podem auxiliar no desenvolvimento de genótipos mais eficientes, com implicações diretas no processo de eficiência de uso de água. No primeiro experimento (*Experimento I*), objetivou-se avaliar as mudanças morfológicas e fisiológicas promovidas pela redução do suprimento de K, em dois genótipos de cana-de-açúcar (SP90-3414 e SP83-2847), por meio da quantificação da área foliar; aspectos morfológicos do sistema radicular (comprimento total e superfície total de raízes); produção de biomassa de raízes e parte aérea; concentração e acúmulo de K nos tecidos vegetais; partição de fotoassimilados (porcentagem de açúcares solúveis totais [AST] e redutores [AR]); atividade da enzima redutase do nitrato (RNO_3^-); potencial da água na folha (Ψ_a) e parâmetros de trocas gasosas (taxa de assimilação de CO_2 [A], condutância estomática [gs] e transpiração [E]). As concentrações de K empregadas na solução nutritiva foram de 1 e 6 mmol L^{-1} , distribuídas conforme delineamento experimental de blocos completos ao acaso, utilizando-se esquema fatorial 2 x 2 (duas doses de K x dois genótipos de cana-de-açúcar), com cinco repetições. As doses promoveram diferenças quanto à absorção e uso do K pelos cultivares, promovendo alterações significativas no acúmulo desse elemento nos tecidos vegetais, na quantidade de açúcares solúveis totais e redutores nos tecidos, nos parâmetros morfológicos e produtivos da parte aérea e do sistema radicular, bem como nos atributos fisiológicos da fotossíntese e da redução do nitrato. No segundo experimento (*Experimento II*) objetivou-se avaliar a influência do déficit hídrico nos parâmetros morfológicos e fisiológicos das plantas, bem como estudar o comportamento desses parâmetros em função do aumento da concentração de K disponível no substrato. As análises tiveram como objetivo avaliar as relações hídricas das plantas e a interferência dessa condição hídrica nos processos de trocas gasosas, bem como relacionar os parâmetros de eficiência de uso de K (KU_tE) com a eficiência de uso de água (EUA). O experimento foi conduzido em vasos contendo 8 dm^3 de terra, o delineamento experimental também foi o de blocos completos ao acaso, utilizando esquema fatorial 2 x 2 x 2 (duas doses de K x dois regimes hídricos x dois cultivares), sendo utilizadas as doses de K de 1 e 6 $\text{mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$ de terra, os regimes hídrico de 70% e 20% da capacidade máxima de armazenamento de água do solo e os genótipos SP90-3414 (suscetível) e SP83-2847 (tolerante ao estresse hídrico). Constataram-se incrementos nos parâmetros hídricos e de trocas gasosas dos cultivares desenvolvidos com adequado suprimento de K e submetidos ao déficit hídrico, indicando haver relação positiva entre a adubação potássica e a resistência das plantas de cana-de-açúcar submetidas a condição hídrica adversa. Ou seja, a eficiência de uso da água (EUA) no genótipo tolerante (SP83-2847) pode ser resultado direto da eficiência de uso de K (KU_tE).

Palavras-chave: Açúcares solúveis totais. Avaliação nutricional. Déficit hídrico. Trocas gasosas.

ABSTRACT

ZANCHIM, B. J. **Potassium and water use efficiencies in sugarcane genotypes.** 2015. 115 p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

Sugarcane has marked genotypic variation related to nutrient use efficiency, which in turn the approach of this subject in scientific research prioritizes studies related to nitrogen (N) and phosphorus (P), but due to the essentiality of potassium (K) as a nutrient, and its importance in the Brazilian economy, researches related to K use efficiency can help the development of efficient genotypes, which, because the K water relation functions in plants may have a direct relation in the water use efficiency. In the first experiment were evaluate the changes in morphological and physiological sugarcane genotypes (SP90-3414 and SP83-2847) promotes by the reduction of K concentration, the parameters were quantifying the leaf area; root system morphology (total length and total surface area of roots); biomass of roots and shoots; K concentration and accumulation in plant tissues; total soluble and reduced sugars percentage; activity of the enzyme nitrate reductase; leaf water potential and gas exchange parameters. The K concentrations used in the nutrient solution were 1 and 6 mmol L⁻¹, distributed as experimental design of randomized complete block design, using a factorial 2 x 2 (two K rates x two sugarcane genotypes), with five replications. The rates caused differences in the K uptake efficiency by cultivars, triggering positive changes in their accumulation in plant tissues and the morphological and physiological parameters. The second experiment were to evaluated the influence of water deficit on morphological and physiological parameters of the plants and to study the behavior of these parameters according to the increase of the available K concentration. The analysis aimed to evaluate the water relations in plants and the water status interference in the gas exchange process, as well as relating the parameters of the K use efficiency with the efficiency of water use. The experiment was conducted in pots containing 8 dm³ of soil, the experiment was also conducted in a randomized block design, using a factorial 2 x 2 x 2 (two K rates x two water regimes x two sugarcane cultivars), and the K rates used was 1 and 6 mmol_c dm⁻³ of soil, water regimes was 70% and 20% of field capacity and the genotypes were the same as the first experiment. The results shows improvements in water and gas exchange parameters of cultivars developed in high-level K and subjected to water deficit, showing a positive relationship between potassium fertilization and sugarcane plant resistance to adverse water condition. On average, the highest water use efficiency (WUE) of SP83-2847 tolerant genotype may result from potassium use unction (KU_{tE}).

Keywords: Total soluble sugars. Nutritional evaluation. Water deficit. Leaf gas exchange.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1 A cultura da cana-de-açúcar	17
2.2 Potássio e a cana-de-açúcar.....	19
2.3 Nutrição potássica e a resistência ao déficit hídrico.....	22
REFERÊNCIAS	25
3 RESPOSTAS MORFOLÓGICAS E FISIOLÓGICAS DE DOIS CULTIVARES DE CANA-DE-AÇÚCAR DESENVOLVIDOS EM CONDIÇÃO DE BAIXO SUPRIMENTO DE POTÁSSIO	31
Resumo.....	31
MORPHOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL RESPONSES OF TWO SUGARCANE GENOTYPES DEVELOPED IN LOW POTASSIUM SUPPLY	32
Abstract	32
3.1 Introdução	33
3.2 Material e Métodos.....	35
3.2.1 Local, período e espécie vegetal.....	35
3.2.2 Instalação, desenvolvimento e delineamento experimental	35
3.2.3 Coleta do material vegetal e avaliações de parâmetros produtivos da parte aérea.....	36
3.2.4 Avaliações de parâmetros produtivos e morfológicos do sistema radicular	37
3.2.5 Concentração e acúmulo de potássio e sódio	37
3.2.6 Determinação dos açúcares solúveis totais e açúcares redutores	37
3.2.7 Eficiência de absorção e de uso de potássio.....	38
3.2.8 Eficiência de uso de água	39
3.2.9 Taxa de assimilação de CO ₂ , condutância estomática e transpiração	39
3.2.11 Potencial da água na folha.....	39
3.2.12 Determinação da atividade da redutase do nitrato.....	40
3.3 Resultados e Discussão	40
3.3.1 Concentração e acúmulo de potássio nas folhas, colmo e raízes	40
3.3.2 Concentração e acúmulo de sódio nas folhas, colmo e raízes.....	44
3.3.3 Massa seca de folhas (FS + FI), colmo e área foliar total	48
3.3.4 Massa seca de raízes, comprimento e superfície radicular.....	51
3.3.5 Porcentagem de açúcares totais e redutores	54
3.3.6 Eficiência de uso e absorção de potássio.....	56
3.3.7 Taxa de assimilação de CO ₂ e condutância estomática.....	58

3.3.8 Transpiração e consumo de água.....	60
3.3.9 Eficiência de uso de água	62
3.3.10 Potencial da água na folha.....	64
3.3.11 Atividade da redutase do nitrato.....	65
3.4 Conclusões.....	66
Referências	67
4 INFLUÊNCIA DO POTÁSSIO EM DOIS CULTIVARES DE CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDOS AO DÉFICIT HÍDRICO	77
Resumo.....	77
POTASSIUM INFLUENCE IN TWO SUGARCANE CULTIVARS SUBMITTED TO WATER DEFICIT	78
Abstract	78
4.1 Introdução.....	79
4.2 Material e Métodos.....	80
4.2.1 Local, período e espécie vegetal.....	80
4.2.2 Instalação, desenvolvimento e delineamento experimental.....	81
4.2.3 Determinação do potencial da água na folha (Ψ_a)	82
4.2.4 Determinação do extravasamento de eletrólitos (EE)	82
4.2.5 Taxa fotossintética, condutância estomática e transpiração	82
4.2.6 Coleta do material vegetal e avaliações de parâmetros produtivos da parte aérea	82
4.2.7 Avaliações de parâmetros produtivos e morfológicos do sistema radicular.....	83
4.2.8 Concentração e acúmulo de potássio.....	83
4.2.9 Eficiência de uso de potássio e da água.....	84
4.3 Resultados e Discussão.....	84
4.3.1 Trocas gasosas e eficiência de uso da água	84
4.3.2 Relações hídricas nas folhas	90
4.3.3 Concentração de acúmulo de potássio.....	93
4.3.4 Parâmetros produtivos e morfológicos da parte aérea	99
4.3.5 Parâmetros produtivos e morfológicos do sistema radicular	103
4.3.6 Eficiência de uso de potássio.....	107
4.4 Conclusões.....	109
Referências	110

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma cultura predominantemente cultivada em regiões subtropicais, sendo comercialmente produzida em aproximadamente 79 países, destacando-se o Brasil, Cuba, Índia, México, China, Filipinas, Austrália, África do Sul, Estados Unidos da América (principalmente Havaí), República Dominicana e Formosa, ocupando, no mundo, uma área de cerca de 12 milhões de hectares. No Brasil a previsão de área cultivada com cana-de-açúcar que será colhida e destinada à atividade sucroalcooleira, na safra de 2014/15, será de aproximadamente 9 milhões de hectares, divididos principalmente entre os estados de São Paulo (52% da área total), Goiás (9,5%), Minas Gerais (8,9%), Mato Grosso do Sul (7,4%), Paraná (7,1%), Alagoas (4,3%) e Pernambuco (2,9%), responsáveis por aproximadamente 92,1% da produção nacional (CONAB, 2014).

Os principais produtos gerados a partir da cana-de-açúcar são o açúcar e o etanol. Na safra de 2014/15 a previsão de produção de açúcar está estimada em 36,36 milhões de toneladas, enquanto que a produção de etanol está estimada em 28,66 bilhões de litros (etanol anidro + hidratado), dados que conferem ao Brasil o título de maior produtor de açúcar e etanol derivados da cana-de-açúcar, seguidos por Índia e China (CONAB, 2014). A cultura tem um papel ambiental muito importante uma vez que o etanol é uma das melhores alternativas para reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa, com redução aproximada de 70% do CO₂ emitido para a atmosfera em relação à gasolina. As questões ambientais na agricultura brasileira são marcadas, principalmente, por duas datas posteriores a Conferência de Estocolmo em 1972, sendo a primeira delas em 1987 por meio do relatório de Brundtland, quando pela primeira vez foi empregado o termo Agricultura Sustentável, e em 1992 por meio da reunião da ONU, a ECO92, onde foi debatido, entre outros assuntos, metas para controlar a emissão de CO₂ na atmosfera, abrindo caminho para o Protocolo de *Kyoto* (1997). Essas questões aumentaram a demanda por pesquisas relacionadas à produção de energia renovável no mundo todo.

O Brasil destaca-se nesse contexto devido à tecnologia já existente na produção do etanol, sendo o momento atual de expansão da área de plantio de cana-de-açúcar. Entre os fatores que limitam a expansão da cultura no Brasil, merecem destaque a disponibilidade hídrica e a fertilidade do solo, fatores que limitam o desenvolvimento fisiológico dos vegetais e a produtividade da cultura. A região Centro-Sul normalmente dispensa a prática da irrigação devido aos seus altos índices de pluviosidade anual, porém para a safra de 2014/15 a estiagem e temperaturas acima da média promoveram queda de 2,5% na produção em relação à safra

anterior (2013/14) sendo que, o impacto apenas não foi maior devido ao aumento de 2,2% da área plantada no país em 2014/15, já a região do Nordeste e Centro-Oeste brasileiro apresentam, normalmente, baixos índices de pluviosidade anual e altas taxas de evapotranspiração, necessitando o uso de água para irrigação. Dessa forma, tecnologias empregadas para melhor uso da água de irrigação e para o melhoramento de genótipos que apresentem maior eficiência no uso da água, e também de nutrientes, são ferramentas essenciais para a expansão da cultura no país.

Em relação aos nutrientes, o potássio (K) destaca-se entre os macronutrientes mais preocupantes economicamente no cenário do agronegócio brasileiro. O Brasil possui apenas 2% das reservas mundiais de K, ocasionando numa dependência de importações para manutenção da agricultura nacional. Considerando-se os anos de 2006 a 2010, o Brasil importou, em média, 90% dos fertilizantes potássicos utilizados na agricultura (ANDA, 2010). Assim, o desenvolvimento e/ou caracterização de genótipos eficientes na utilização desse nutriente também se faz necessário no cenário nacional de fertilizantes. Muitos estudos demonstram uma relação entre as funções desempenhadas pelo K na planta e a melhoria na eficiência de uso de água para diversas culturas, tais como algodão (TSONEV et al., 2011), canola (ALI; BAKHT; KHAN, 2014), eucalipto (DE ALMEIDA, 2009) e outras. Portanto, conciliar duas opções de ferramentas para o manejo correto e expansão da cultura no país se torna premente.

Partindo do princípio que a deficiência de K afeta atributos morfológicos e bioquímicos nas plantas, e que alguns genótipos são mais eficientes no uso de água e de potássio, a hipótese dessa pesquisa é que: (i) os efeitos morfológicos provocados pela deficiência de K reduzem a taxa de assimilação de CO₂ das plantas menos eficientes quanto ao uso de potássio; (ii) o suprimento adequado de K resulta em um equilíbrio melhor dos processos relacionados a taxa de assimilação de CO₂ e transpiração foliar, resultando em maior eficiência no uso de água pela cultura, favorecendo seu desenvolvimento e aumentando sua produção. Dessa forma, esta pesquisa teve como objetivo principal avaliar o efeito da deficiência de K sobre os atributos morfológicos e fisiológicos de plantas de cana-de-açúcar cultivadas em ambiente protegido, com o objetivo de correlacionar atributos como área foliar e morfologia do sistema radicular com a taxa fotossintética e o uso eficiente de água e de K.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar pertence à família Poaceae e ao gênero *Saccharum*, que abrange várias espécies, porém, as canas atualmente cultivadas, na sua maioria, são híbridas. É uma planta perene e própria de climas tropicais e subtropicais. Há várias espécies pertencentes ao gênero *Saccharum*: *S. officinarum* L., *S. spontaneum* L., *S. robustum* J., *S. sinense* R., *S. barberi* J. Diversos pesquisadores afirmam que *S. sinense* e *S. barberi* são originárias de retrocruzamento de *S. officinarum* e *S. spontaneum*, mas as variedades hoje em cultivo comercial são híbridas de várias espécies (CLAYTON; DANIELS, 1975). O centro de origem dessas espécies tem sido reportado por diversos autores. As ilhas do Arquipélago da Polinésia, a nova Guiné e a Índia estão entre as regiões mais citadas e, dessa forma, acredita-se que a cana-de-açúcar seja nativa do sudeste da Ásia, embora o exato centro de origem seja incerto. No Brasil, a cana-de-açúcar foi introduzida oficialmente em 1532 por Martim Afonso de Souza (DE CARLI, 1936), época em que apenas uma variedade de cana-de-açúcar era cultivada, denominada de Creola, Crioula ou Mirim, essa única variedade é considerada um híbrido natural de *S. barberi* x *S. officinarum* (EDGERTON, 1955).

Essa cultura apresenta grande versatilidade no mercado nacional. A cana-de-açúcar pode ser utilizada como cultura forrageira na alimentação animal, apresentando-se como boa opção devido a sua facilidade de cultivo, possibilidade de colheita na época de estiagem (escassez de outras forrageiras) e grande produção de massa verde, apesar de apresentar características indesejáveis para esse uso, tais como os baixos teores de proteína e minerais e a baixa digestibilidade da matéria seca, algumas variedades foram desenvolvidas para suprir as necessidades da cana-de-açúcar como forrageira, tal como a variedade IAC86-2480 (DOS ANJOS; DA SILVA; CAMPANA, 2010). A cachaça é outro produto derivado da cana-de-açúcar e de alto consumo no Brasil (aproximadamente 1,5 bilhão de litros por ano), porém o fato de prevalecer pequenos produtores no setor este apresenta dificuldades principalmente em relação às baixas produtividades resultantes do manejo inadequado e do uso de variedades há muito tempo cultivadas, com sérios problemas de degenerescência varietal e, muitas vezes, inadequadas ao solo e clima da região onde são cultivadas (SEBRAE, 2001). Além das utilidades descritas acima, o palhiço remanescente do sistema de colheita mecanizada e o bagaço de cana gerado a partir da moagem, são utilizados como fonte na cogeração de energia elétrica (RIPOLI; MOLINA JUNIOR; RIPOLI, 2000). Porém, as principais atividades comerciais relacionadas à cana-de-açúcar, no Brasil, estão na produção de açúcar e etanol.

Em cultivos comerciais a cana-de-açúcar é propagada assexuadamente por meio de pedaços de colmos, denominados toletes, contendo duas ou três gemas no estado latente, que encontrando condições favoráveis, passam ao estado ativo de crescimento e desenvolvimento (VAN DILLEWIJN, 1952). O desenvolvimento é dividido em quatro estádios fenológicos bem definidos: (1) fase de brotação e estabelecimento, (2) fase de perfilhamento, (3) período de crescimento da parte aérea e (4) fase de maturação (CÂMARA, 1993; RIPOLI et al., 2006). A fase de brotação é um processo biológico que utiliza energia originária da degradação de substâncias de reserva do tolete, por meio do processo de respiração, sendo o processo gradativamente reduzido à medida que o sistema radicular se desenvolve, aumentando a superfície ativa de absorção de água e nutrientes do solo. Porém, muitos fatores interferem nessa primeira fase fenológica, tanto de ordem ambiental (*e.g.* temperatura e umidade do solo), quanto genéticos e fisiológicos (variedades e tamanho / idade das gemas). Christoffoleti (1986) citou que, em temperaturas inferiores a 21°C, a brotação é muito lenta e, acima disso, ela aumenta progressivamente, até atingir um ótimo, entre 27°C e 32°C. Singh e Srivastava (1973) mostraram os efeitos dos diferentes níveis de retenção de água no solo sobre o desenvolvimento inicial dos brotos e raízes de cana-de-açúcar, demonstrando que conforme o potencial de água no solo aumenta a porcentagem de brotação reduz significativamente. Para Casagrande e Vasconcelos (2010), as reações bioquímicas que regulam o processo de brotação são controlados geneticamente, sendo que diversas condições ambientais regulam a expressão gênica das variedades. A boa capacidade de brotação é uma característica desejável das variedades, principalmente quando o período de plantio envolve épocas com condições ambientais desfavoráveis (SILVA; CARLIN; PERECIN, 2004).

Após a brotação das gemas, começam a se formar outros rebentos, aos quais se denominam perfilhos, dando origem ao segundo estágio fenológico da cultura. Todos os perfilhos apresentam sistema radicular próprio e após o corte da cana-planta o sistema radicular mantém-se em atividade por determinado tempo, quando posteriormente ocorre a substituição pelos sistemas radiculares dos perfilhos da soqueira (BACCHI, 1985). Dentre os fatores que podem interferir no processo de perfilhamento estão: a variedade, a luminosidade, a temperatura, a nutrição equilibrada e a umidade do solo. Segundo Inman-Bamber (2004), o perfilhamento tende a se estabilizar em temperaturas próximas aos 16°C, porém, Casagrande (1991) demonstrou que o aumento gradativo da temperatura, até cerca de 30°C, promove aumento da taxa de perfilhamento. Este autor também associa a maior formação de perfilhos em condições de alta luminosidade à redução do fluxo de auxina nessas condições, reduzindo, assim, o grau de inibição das gemas laterais. A fase de crescimento da parte aérea da cana-de-

açúcar é favorecida devido ao seu metabolismo C₄, ou seja, essa categoria de plantas, assim como o milho e o sorgo, apresentam alta taxa de fotossíntese líquida associado com alto ponto de saturação por luz, apresentam eficiência do uso da água cerca de duas a três vezes maior em relação às plantas de metabolismo C₃, além de ausência de fotorrespiração.

O processo de maturação da cana-de-açúcar pode ser definido de acordo com dois aspectos: (1) do ponto de vista fisiológico – quando o colmo atinge seu potencial de armazenamento de sacarose e (2) ponto de vista botânico – ocorre após a emissão de flores e formação de sementes (SILVA, 1989). Sob o ponto de vista fisiológico, Rodrigues (1995) cita o teor de água, nitrogênio e potássio no solo, e a temperatura, como fatores de maior importância na interferência do grau de maturação da cana-de-açúcar, sendo que as variedades de cana-de-açúcar demonstram diferentes respostas a susceptibilidade e resistência quanto ao potencial hídrico do solo. Porém, do ponto de vista botânico o florescimento da cana-de-açúcar é controlado por um complexo de fatores, envolvendo principalmente o fotoperíodo, a temperatura, a umidade e a radiação solar (CASTRO, 2001).

2.2 Potássio e a cana-de-açúcar

O potássio (K) é o elemento mais extraído pela cultura da cana-de-açúcar (DE OLIVEIRA et al., 2010). Segundo a classificação dos nutrientes minerais, proposta por Mengel e Kirkby (2001), levando-se em consideração a sua função bioquímica, o K se encontra no grupo dos elementos presentes em forma iônica na planta, ou seja, na forma de íons livres (K^+) dissolvidos no conteúdo celular do vegetal. A concentração de K^+ no citosol é mantida, geralmente, entre 100-200 mM (LEIGH; WYN JONES, 1984), enquanto que no vacúolo a concentração desse elemento pode variar entre 10-200 mM (HSIAO; LÄUCHLI, 1986), concentrações de até 500 mM de K foram encontradas nas células guarda dos estômatos (OUTLAW, 1983). Spironello et al. (1997) determinaram a faixa de suficiência para a concentração de K nas folhas de cana-de-açúcar, encontrando teores de K variando entre 10 a 16 g kg⁻¹ de massa seca. Os sintomas de deficiência de K são observados nas folhas velhas inicialmente, com a formação de manchas mosqueadas (verde-claras e verde-escuras), manchas avermelhadas na nervura central das folhas e bordas das folhas velhas marrons que evoluem para necróticas.

As funções desempenhadas por esse nutriente na planta estão relacionadas com: a ativação de mais de 50 enzimas envolvidas na síntese de carboidratos, síntese proteica, processo fotossintético, osmorregulação (especialmente nos estômatos, desempenhando papel chave na absorção e eficiência de uso de água pelas plantas), no equilíbrio de carga nas

células e na redistribuição de açúcares via floema (KINGSTON, 2014). Armengaud et al. (2009) demonstraram que alterações na atividade enzimática promovidas pela deficiência de K provocam mudanças típicas no metabolismo vegetal, como o aumento do conteúdo de carboidratos solúveis, ao passo que as concentrações de nitrato e piruvato são reduzidas. A disponibilidade de K tem efeito indireto sobre o acúmulo de determinadas poliaminas, como a diamina putrescina, a triamina espermidina e a tetraamina espermina (WATSON; MALMBERG, 1996; FARIDUDDIN et al., 2013), sendo que a biossíntese de putrescina durante a deficiência de K é uma resposta ao desequilíbrio iônico causado pela acidificação do suco celular intensificado pelo excesso de amônio, bem como pelo aumento da atividade de enzimas que convertem arginina, ornitina e citrulina em putrescina (MALAVOLTA, 2006). Segundo Rosseto et al. (2010), para o processo industrial de fabricação do açúcar, o excesso de K não é desejável, pois como é o maior constituinte das cinzas, estas, em alta concentração no caldo, dificultam a cristalização, em função da formação de núcleos falsos, reduzindo o rendimento industrial de açúcar. Porém, os altos teores de cinzas favorecem a produção de álcool, agindo como fonte de nutrientes para as leveduras.

As plantas absorvem o K na forma de íon K^+ da solução do solo e, para que a absorção efetivamente ocorra, é necessário que o nutriente entre em íntimo contato com a superfície da raiz. A difusão e o fluxo de massa são os principais mecanismos de transferência (contato íon-raiz) do K^+ da solução do solo até a superfície radicular, sendo o processo de difusão responsável por aproximadamente 90% da quantidade de K^+ absorvida (BARBER, 1968; VARGAS; MEURER; ANGHINONI, 1983; RUIZ; MIRANDA; CONCEIÇÃO, 1999; ROSOLEM et al., 2003). A absorção e o transporte do K^+ ao longo da planta são facilitados por proteínas da membrana (transportadores e canais de cátions) que permitem seu movimento através da membrana plasmática (MARSCHNER, 2012). No solo, a maior parte do K, aproximadamente 98%, encontra-se na estrutura dos minerais primários e secundários (K estrutural), e só uma pequena fração encontra-se em formas mais prontamente disponíveis às plantas, seja ligado às cargas elétricas negativas (K trocável), seja na solução do solo (K solução) (SPARKS, 2000). O K estrutural está presente nas estruturas de minerais primários e, ou, secundários e somente é liberado para a solução do solo a partir da intemperização dos mesmos. O processo de intemperização é muito lento e depende de muitos fatores físicos, químicos e biológicos. Logo, as quantidades de K liberadas a partir desse processo são pequenas e, na maioria das vezes, insuficientes para suprir a demanda das plantas. O K trocável é a fonte de maior interesse para a nutrição vegetal, pois restitui rapidamente o K retirado da solução do solo, seja pelas plantas ou pelo processo de lixiviação.

Essa forma de K encontra-se ligada eletrostaticamente às cargas negativas nas superfícies das frações orgânicas e inorgânicas (ERNANI; DE ALMEIDA; DOS SANTOS, 2007). Outras formas de K podem ser encontradas em solos com predomínio de minerais de argila 2:1, denominadas de K não trocável e K fixado, sendo os teores de K não trocável, encontrados em solos com minerais 1:1, semelhantes aos do K trocável (VILLA; FERNANDES; FAQUIN, 2004). Já a fixação de K nos solos brasileiros é praticamente inexistente, ou pouco expressiva, em decorrência da predominância de solos com mineralogia 1:1 (ERNANI; DE ALMEIDA; DOS SANTOS, 2007).

A análise de solo é a técnica mais utilizada e eficiente para avaliar a disponibilidade de K para os vegetais. No Brasil, a determinação do K para fins de análise da fertilidade do solo, é realizada por meio da utilização do extrator Mehlich-1 ou da resina trocadora de íons e, a partir dos resultados, é feita a recomendação de adubação potássica para a cultura em questão. Para a cultura da cana-de-açúcar muitos autores estudaram, ao longo dos anos, o nível crítico de K no solo, encontrando valores variando de $1,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (CHALITA, 1991) até $2,3 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (ORLANDO FILHO, 1983), sendo que a adubação é baseada no nível de K presente no solo e na expectativa de produtividade, nesta última estão implícitos os conceitos de ambiente de produção (solos com alta fertilidade e com bom armazenamento de água e variedades responsivas). A recomendação é que a adubação potássica seja parcelada no sulco de plantio e em cobertura, evitando perdas por lixiviação (principalmente no período chuvoso de plantio) e pelo fato do sistema radicular da cana-de-açúcar ainda não ter se estabelecido. Lana et al. (2004) demonstraram que o parcelamento de metade da dose de K 6 meses após o plantio, ou 2/3 da dose após os 6 meses, promoveu ganhos da ordem de 13 t ha^{-1} para a variedade RB72454 cultivada no município de Igarapava-SP. Outro critério possível para a adubação potássica leva em conta a concentração de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) no solo, como demonstrado por Reis Junior (2001). Este autor analisou os resultados de 106 experimentos e verificou que a relação $K(\text{Ca} + \text{Mg})^{-0,5}$ pode ser utilizada como critério para orientar a adubação potássica. Quanto maior a relação, menor a probabilidade de resposta. Nesse sentido, o autor indicou os índices 0,254 como baixo, de 0,254 a 0,335 como média e maior que 0,335 como alto (REIS JUNIOR, 2001).

A adubação potássica realizada na cana-de-açúcar utiliza principalmente adubos inorgânicos, tais como o cloreto de K, sulfato de K, sulfato duplo de K e Mg e nitrato de K, sendo o cloreto de K o principal deles. Outra fonte importante de K utilizada nos canaviais é a vinhaça. A vinhaça é um resíduo resultante da produção de etanol que apresenta concentrações de K (calculado como K_2O) variando entre 1,2 a $7,83 \text{ kg m}^{-3}$, dependendo do

tipo de mosto (melaço, caldo ou misto) (PRADA; GUEKEZIAN; SUÁREZ-IHA, 1998). Porém, sua aplicação deve seguir os critérios desenvolvidos pela Companhia Ambiental (CETESB) e regidos pela norma técnica P4.231 de 2005, em que a dosagem a ser aplicada leva em consideração a CTC (capacidade de troca catiônica) do solo, concentração de K no solo, potencial de extração de K pela cana-de-açúcar e a concentração de K na vinhaça. Diversos autores citam que a vinhaça pode alterar as características do solo, tais como elevação do pH, elevação da CTC e a quantidade de alguns nutrientes, aumento da atividade biológica promovendo maior número de bactérias e fungos (CAMARGO; VALADARES; GERALDI, 1983, GLÓRIA; ORLANDO FILHO, 1983).

Rossetto et al. (2004) demonstraram efeito linear da adubação potássica (50, 100 e 200 kg ha⁻¹ de K₂O) nas médias de produtividade de colmos (t ha⁻¹) em quatro diferentes regiões do Estado de São Paulo. Porém, Penatti e Donzelli (2001) citam que, para a cana-planta, recomenda-se aplicar como dose máxima econômica, 140 kg ha⁻¹ de K₂O. Relações semelhantes são encontradas para a aplicação de vinhaça, Paulino et al. (2002) observaram um acréscimo significativo na produtividade de colmos de cana-de-açúcar devido a aplicação de vinhaça em relação ao tratamento sem vinhaça, não encontrando porém, diferenças significativas entre as doses aplicadas.

2.3 Nutrição potássica e a resistência ao déficit hídrico

Segundo Taiz e Zeiger (2004), o déficit hídrico pode ser definido como todo o conteúdo de água de um tecido, ou célula, situado abaixo do conteúdo de água mais alto exibido no estado de maior hidratação. Quando o déficit hídrico apresenta evolução suficientemente lenta para permitir mudanças nos processos de desenvolvimento, o estresse hídrico promove vários efeitos sobre o crescimento, um dos quais é a limitação da expansão foliar. Esses autores apresentam ainda, três principais mecanismos de adaptação das plantas ao estresse hídrico, sendo eles: (1) redução da área foliar, (2) crescimento radicular e (3) controle estomático. Em condições adversas de desenvolvimento (estresses) têm-se observado uma relação positiva entre a nutrição potássica e seus efeitos positivos sobre a produtividade das culturas nessas condições, tanto em condições de estresses abióticos (CAKMAK, 2005), quanto para os bióticos (PRABHU et al., 2007).

Essa relação entre o aumento do suprimento de K as plantas e a amenização dos efeitos negativos, ocasionados pelo estresse hídrico, se deve principalmente as funções desempenhadas pelo K no organismo vegetal, principalmente aquelas relacionadas com a manutenção da turgescência celular. O desenvolvimento de uma cultura em solos com baixa

disponibilidade hídrica depende da redução do potencial osmótico da planta, fato que ocorre com o aumento da concentração de substâncias osmóticas na célula, permitindo a manutenção da absorção de água do solo e turgescência celular (TAIZ; ZEIGER, 2004). Folhas com capacidade de ajuste osmótico podem claramente manter a turgescência sob potenciais hídricos mais baixos que as folhas não ajustadas, possibilitando a continuidade do alongamento celular e facilitando as maiores taxas de condutâncias estomáticas sob potenciais hídricos mais baixos, sugerindo que o ajuste osmótico é uma aclimação que aumenta a tolerância à desidratação (TAIZ; ZEIGER, 2004). Esse ajuste osmótico pode ser acompanhado pela síntese de solutos compatíveis, como os açúcares ou aminoácidos (HU; SCHMIDHALTER, 2005), ou então pela absorção e armazenamento de íons nas células, sendo esta última, a alternativa energeticamente mais “barata” para a planta, pois não depende da redistribuição dos fotoassimilados sintetizados. O K^+ é o principal íon osmótico das plantas (WHITE, 2003), fator determinante no processo de expansão celular (MENGEL; ARNEKE, 1982). A inibição da expansão celular provoca lentidão da expansão foliar no início do desenvolvimento de déficits hídricos, conseqüentemente a área foliar diminui, promovendo uma redução na quantidade de água transpirada, conservando, efetivamente, um suprimento maior de água no solo (TAIZ; ZEIGER, 2004). A relação raiz : parte aérea tende a crescer em condições de estresse hídrico, com o objetivo de explorar um maior volume de solo o crescimento do sistema radicular em direção às zonas úmidas do solo exige alocação de fotoassimilados para os seus ápices (meristemas) em crescimento. A redistribuição dos fotoassimilados guarda relação direta com a concentração de K nos tecidos vegetais, sendo que a deficiência desse elemento provoca o acúmulo de sacarose nos tecidos fotossinteticamente ativos, gerando baixo suprimento de energia para as raízes (ZHAO; OOSTERHUIS; BEDNARZ, 2001; HERMANS et al., 2006).

O fechamento dos estômatos em condições de estresse hídrico está diretamente ligado a redução da pressão de turgescência das células estomáticas (COLLATZ et al., 1991), resultado de sinais radiculares mediados pelo hormônio ácido abscísico (ABA) (DOWNTON; LOVEYS; GRANT, 1988; FORT et al., 1997; ZÖRB; SENBAYRAM; PEITER, 2014). O ABA é sintetizado continuamente em taxas baixas nas células do mesófilo e tende a se acumular nos cloroplastos, a partir do momento que o mesófilo começa a se desidratar parte desse ABA armazenado é liberado no apoplasto (HARTUNG; WILKINSON; DAVIES, 1998) quando é transportado para as células-guarda por meio do fluxo transpiratório criando canais de efluxo de K (TAIZ; ZEIGER, 2004). O controle de abertura e fechamento estomático limita a perda de água pela planta e também é influenciado pelas concentrações de

K^+ . Esse íon é exigido para a abertura adequada dos estômatos, pois fornece a força motriz necessária para o influxo de água nos vacúolos das células-guarda (PEITER, 2011). A função do K no processo de fechamento dos estômatos ocorre devido ao potencial de pressão que seu acúmulo exerce nas células da epiderme, mantendo a turgescência dessas células e promovendo o pleno fechamento estomático (ROELFSEMA; HEDRICH, 2002). Uma explicação alternativa para a limitação do processo de fechamento estomático em plantas deficientes em K é baseada no aumento de produção de etileno induzido pela deficiência de K (SHIN; SCHACHTMAN, 2004; WANG et al., 2013), interferindo negativamente na sinalização do ABA (TANAKA et al., 2005).

Em condições moderadas de déficit hídrico é comum a observação de um aumento na eficiência de uso de água, pois a medida que os estômatos fecham durante os estádios iniciais do estresse uma maior quantidade de CO_2 é absorvida por unidade de água transpirada, isso ocorre principalmente devido a maior redução do processo transpiratório do que da redução nas concentrações intercelulares de CO_2 . A medida que o estresse torna-se rigoroso, no entanto, a desidratação das células do mesofilo inibe a fotossíntese, o metabolismo do mesofilo é prejudicado e a eficiência de uso de água geralmente decresce (TAIZ; ZEIGER, 2004). Porém, existem evidências de que grande parte da amenização dos efeitos ocasionados pelo estresse hídrico, atribuídos ao K, não se deve a melhor regulação do movimento estomático das plantas, e sim devido aos efeitos positivos que esse elemento proporciona ao processo de fotossíntese, fixação de CO_2 , metabolismo primário, carregamento do floema e redistribuição de fotoassimilados aos órgãos dreno (SEN GUPTA; BERKOWITZ; PIER, 1989; CAKMAK; HENGELER; MARSCHNER, 1994). Isso está relacionado ao fato de que o fechamento estomático durante o dia limita a difusão de CO_2 e, conseqüentemente, a fotossíntese, podendo conduzir ao aumento da geração de espécies reativas de O_2 (ROS). A seca também resulta em um desarranjo na alocação de elétrons para o O_2 , produzindo também ROS e provocando o estresse oxidativo (CAKMAK, 2005). Portanto, para manter a assimilação de CO_2 adequada o suprimento de K para as culturas deve ser maior em condições de seca, quando comparadas aquelas em condições hídricas normais (RÖMHELD; KIRKBY, 2010).

REFERÊNCIAS

- ARMENGAUD, P.; SULPICE, R.; MILLER, A.J.; STITT, M.; AMTMANN, A.; GIBON, Y. Multilevel analysis of primary metabolism provides new insights into the role of potassium nutrition for glycolysis and nitrogen assimilation in *Arabidopsis* roots. **Plant Physiology**, Rockville, v. 150, p. 772-785, 2009.
- BACCHI, O.O.S. **Ecofisiologia da cana-de-açúcar**. Piracicaba: IAA/Planalsucar, 1985. 20 p.
- BARBER, S.A. Mechanism of potassium absorption by plants. In: KILMER, V.J.; YOUNTS, S.E.; BRADY, N.C. (Ed.). **The role of potassium in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1968. p. 293-310.
- CÂMARA, G.M.S. Ecofisiologia da cultura da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G.M.S.; OLIVEIRA, E.A.M. (Ed.). **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ, 1993. p. 31-64.
- CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S. da; GERALDI, R.N. **Características químicas e físicas de solo que recebeu vinhaça por longo tempo**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1983. 30 p.
- CASAGRANDE, A.A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157 p.
- CASAGRANDE, A.A.; VASCONCELOS, A.C.M. Fisiologia da parte aérea. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2010. p. 57-78.
- CASTRO, P.R.C. **Fisiologia vegetal aplicada à cana-de-açúcar**. Maceió, 2001. 7 p.
- CAKMAK, I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stress in plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 168, p. 521-530, 2005.
- CAKMAK, I.; HENGELER, C.; MARSCHNER, H. Partitioning of shoot and root dry matter and carbohydrates in bean plants suffering from phosphorus, potassium and magnesium deficiency. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 45, p. 1245-1250, 1994.
- CHALITA, R. **Calibração da adubação potássica através da análise química do solo para a cultura da cana-de-açúcar**. 1991. 75 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.
- CHRISTOFFOLETI, P.J. **Aspectos fisiológicos da brotação, perfilhamento e florescimento da cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1986. 80 p.
- CLAYTON, W.D.; DANIELS, C.A. Geographical, historical and cultural aspect of origin of the Indian and Chinese sugarcane *S. barberi* and *S. sinensis*. **ISSCT Sugarcane Breeding Newsletter**, Mackknade, v. 36, p. 4-23, 1975.

COLLATZ, G.J.; BALL, J.T.; GRIVET, C.; BERRY, J.A. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration; a model that includes a laminar boundary layer. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 54, p. 107-136, 1991.

DE CARLI, G. **O açúcar na formação econômica do Brasil**. Rio de Janeiro: Edição Brasil Açucareiro, 1936. v. 2, p. 7-72.

DE OLIVEIRA, E.C.A.; FREIRE, F.J.; DE OLIVEIRA, R.I.; FREIRE, M.B.G.S.; SIMÕES NETO, D.E.; DA SILVA, S.A.L. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1343-1352, 2010.

DOS ANJOS, I.A.; DA SILVA, D.N.; CAMPANA, M.P. Cana-de-açúcar como forrageira. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2010. p. 725-745.

DOWNTON, W.J.S.; LOVEYS, B.R.; GRANT, W.J.R. Stomatal closure fully accounts for the inhibition of photosynthesis by abscisic acid. **New Phytologist**, London, v. 108, p. 263-266, 1988.

EDGERTON, C.N. **Sugarcane and its disease**. Baton-Rouge: Louisiana State University Press, 1955. 290 p.

ERNANI, P.R.; DE ALMEIDA, J.A.; DOS SANTOS, F.C. Potássio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; DE BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 551-594.

FARIDUDDIN, Q.; VARSHNEY, P.; YUSUF, M.; AHMAD, A. Polyamines: potent modulators of plant responses to stress. **Journal of Plant Interactions**, Oxon, v. 8, p. 1-16, 2013.

FORT, C.; FAUVEAU, M.L.; MULLER, F.; LABEL, P.; GRANIER, A.; DREYER, E. Stomatal conductance, growth and root signalling in Young oak seedlings subjected to partial soil drying. **Tree Physiology**, Victoria, v. 17, p. 281-289, 1997.

GLÓRIA, N.A.; ORLANDO FILHO, J. **Aplicação da vinhaça como fertilizante**. Piracicaba: PLANALSUCAR, 1983. 38 p.

HARTUNG, W.; WILKINSON, S.; DAVIES, W.J. Factors that regulate abscisic acid concentrations at the primary site of action at the guard cell. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 49, p. 361-367, 1998.

HERMANS, C.; HAMMOND, J.P.; WHITE, P.J.; VERBRUGGEN, N. How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation? **Trends in Plant Science**, London, v. 11, p. 610-617, 2006.

HSIAO, T.C.; LÄUCHLI, A. Role of potassium in plant-water relations. In: TINKER, B.; LÄUCHLI, A. **Advances in plant nutrition**. 2. ed. New York: Praeger Scientific Publishers, 1986. p. 281-312.

HU, Y.; SCHMIDHALTER, U. Drought and salinity: a comparison of their effects on mineral nutrition of plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Hoboken, v. 168, p. 541-549, 2005.

INMAN-BAMBER, N.G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 89, n. 1, p. 102-122, 2004.

KINGSTON, G. Mineral nutrition of sugarcane. In: MOORE, P.H.; BOTHA, F.C. (Ed.). **Sugarcane: physiology, biochemistry & functional biology**. Indianapolis: Wiley-Blackwell, 2014. p. 85-115.

LANA, R.M.Q.; ZANÃO JUNIOR, L.A.; KORNDÖRFER, G.H.; MACIEL JR., V.A. Parcelamento da adubação potássica na cana-planta. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 23, n. 2, p. 28-31, 2004.

LEIGH, R.A.; WYN JONES, R.G. A hypothesis relating critical potassium concentrations for growth to the distribution and functions of this ion in the plant cell. **New Phytologist**, London, v. 97, p. 1-13, 1984.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

MARSCHNER, P. (Ed.). **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2012. 615 p.

MENGEL, K.; ARNEKE, W.W. Effect of potassium on the water potential, the pressure potential, the osmotic potential and cell elongation in leaves of *Phaseolus vulgaris*. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 54, p. 402-408, 1982.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of Plant Nutrition**. 5. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 849 p.

ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Rio de Janeiro: IAA/PLANALSUCAR, 1983. 368 p.

OUTLAW JUNIOR, W.H. Current concepts on the role of potassium in stomatal movements. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 49, p. 302-311, 1983.

PAULINO, A.F.; MEDINA, C.C.; ROBAINA, C.R.P.; LAURANI, R.A. Produções agrícola e industrial de cana-de-açúcar submetidas a doses de vinhaça. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 23, n. 2, p.145-150, 2002.

PEITER, E. The plant vacuole: emitter and receiver of calcium signals. **Cell Calcium**, Edinburgh, v. 50, p. 120-128, 2011.

PENATTI, C.P.; DONZELLI, J.L. **Avaliação nutricional em cana colhida sem queima da palha**. Piracicaba: COPERSUCAR, 2001. 18 p.

PRABHU, A.S.; FAGERIA, N.K.; HUBER, D.M.; RODRIGUES, F.A. Potassium nutrition and plant diseases. In: DATNOFF, L.E.; ELMER, W.H.; HUBER, D.M. (Ed.). **Mineral nutrition and plant disease**. St. Paul: The American Phytopathological Society Press, 2007. cap. 5.

PRADA, S.M.; GUEKEZIAN, M.; SUÁREZ-IHA, M.E.V. Metodologia analítica para determinação de sulfato em vinhoto. **Química Nova**, São Paulo, v. 21, n. 3, p. 249-252, 1998.

REIS JUNIOR, R.A. Probabilidade de resposta da cana-de-açúcar à adubação potássica em razão da relação $K(Ca + Mg)^{-0.5}$ do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 9, p. 1175-1183, 2001.

RIPOLI, T.C.C.; MOLINA JUNIOR, W.F.; RIPOLI, M.L.C. Energetic potential of the sugar cane biomass in Brazil. **Rivista di Ingegneria Agrária**, Pavia, v. 31, n. 1, p. 2-7, 2000.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C.; CASAGRANDE, D.V.; IDE, B.Y. Noções fitotécnicas. In: _____. **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**. 2. ed. Piracicaba: Ed. dos Autores, 2006. p. 80-88.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: Instituto de Biociência, 1995. 101 p.

ROELFSEMA, M.R.G.; HEDRICH, R. Studying guard cells in the intact plants: modulation of stomatal movement by apoplastic factors. **New Phytologist**, Oxon, v. 153, p. 425-431, 2002.

RÖMHELD, V.; KIRKBY, E.A. Research on potassium in agriculture: needs and prospects. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 335, p. 155-180, 2010.

ROSOLEM, C.A.; MATEUS, G.P.; GODOY, L.J.G.; FELTRAN, J.C.; BRANCALÃO, S.R. Morfologia radicular e suprimento de potássio às raízes de milho de acordo com a disponibilidade de água e potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 875-884, 2003.

ROSSETTO, R.; DIAS, F.L.F.; VITTI, A.C.; TAVARES, S. Potássio. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2010. p. 289-312.

ROSSETTO, R.; SPIRONELLO, A.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. Calagem para cana-de-açúcar e sua interação com a adubação potássica. **Bragantia**, Campinas, v. 63, n.1, p. 105-119, 2004.

RUIZ, H.A.; MIRANDA, J.; CONCEIÇÃO, J.C.S. Contribution of mass flow and diffusion mechanisms for supplying K, Ca and Mg to rice plants. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 1015-1018, 1999.

SEBRAE-MG. **Diagnostico da cachaça de Minas Gerais**. Belo Horizonte: SEBRAE-MG, 2001. 259 p.

SEN GUPTA, A.; BERKOWITZ, G.A.; PIER, P.A. Maintenance of photosynthesis at low leaf water potential in wheat. **Plant Physiology**, Rockville, v. 89, p. 1358-1365, 1989.

SHIN, R.; SCHACHTMAN, D.P. Hydrogen peroxide mediates plant root cell response to nutrient deprivation. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA**, Washington, DC, v. 101, p.8827-8832, 2004.

SILVA, G.M. The use of ethephon to manage sugarcane varieties in diferente locations of the central – Southern region of Brazil. In: CONGRESS OF ISSCT, 20., 1989, São Paulo. **Proceedings...** Quatre-Bornes, Mauritius: International Society of Sugar Cane Technologists, 1989.p. 623-645.

SILVA, M.A.; CARLIN, S.D.; PERECIN, D. Fatores que afetam a brotação inicial da cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 51, p. 457-466, 2004.

SINGH, S.; SRIVASTAVA, K.K. Effects of soil-water potential on germination of sugarcane setts. **Indian Journal of Agricultural Science**, New Delhi, v. 44 p. 184-187, 1973.

SPARKS, D.L. Bioavailability of soil potassium. In: SUMNER, M.E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 2000. seção D, p. 48.

SPIRONELLO, A.; RAIJ, B. van; PENATTI, C.P.; CANTARELLA, H.; MORELLI, J.L.; ORLANDO FILHO, J.; LANDELL, M.G.A.; ROSSETO, R. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 1997. p. 233-239.

TAIZ. L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004.719 p.

TANAKA, Y.; SANO, T.; TAMAOKI, M.; NAKAJIMA, N.; KONDO, N.; HASEZAWA, S. Ethylene inhibits abscisic acid-induced stomatal closure in Arabidopsis. **Plant Physiology**, Rockville, v. 138, p. 2337-2343, 2005.

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

VARGAS, R.M.B.; MEURER, E.J.; ANGHINONI, I. Mecanismos de suprimento de fósforo, potássio, cálcio e magnésio as raízes de milho em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 7, p. 143-148, 1983.

VILLA, M.R.; FERNANDES, L.A.; FAQUIN, V. Formas de potássio em solos de várzea e sua disponibilidade para o feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 649-658, 2004.

WANG, M.; ZHENG, Q.; SHEN, Q.; GUO, S. The critical role of potassium in plant stress response. **International Journal of Molecular Science**, Basel, v. 14, p. 7370-7390, 2013.

WATSON, M.B.; MALMBERG, R.L. Regulation of *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh arginine decarboxylase by potassium deficiency stress. **Plant Physiology**, Rockville, v. 111, p. 1007-1083, 1996.

WHITE, P.J. Improving potassium acquisition and utilisation by crop plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 176, p. 305-316, 2013.

ZHAO, D.L.; OOSTERHUIS, D.M.; BEDNARZ, C.W. Influence of potassium deficiency on photosynthesis, chlorophyll content, and chloroplast ultrastructure of cotton plants. **Photosynthetica**, Dordrecht, v.39, p. 103-109, 2001.

ZÖRB, C.; SENBAYRAM, M; PEITER, E. Potassium in agriculture – Status and perspectives. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 171, n. 9, p. 656-669, 2014.

3 RESPOSTAS MORFOLÓGICAS E FISIOLÓGICAS DE DOIS CULTIVARES DE CANA-DE-AÇÚCAR DESENVOLVIDOS EM CONDIÇÃO DE BAIXO SUPRIMENTO DE POTÁSSIO

Resumo

A cultura da cana-de-açúcar apresenta elevada demanda de potássio (K^+) para o atendimento da sua exigência nutricional. Todavia, os genótipos diferem entre si quanto a eficiência de absorção ($KUpE$) e eficiência de utilização ($KUtE$) desse elemento, provocando, assim, diferenças em seu crescimento. Estudos que contemplem as alterações morfológicas e fisiológicas, em diferentes genótipos moduladas pela disponibilidade de K são importantes para a seleção de cultivares mais eficientes nutricionalmente. Portanto, objetivou-se com esse estudo avaliar os efeitos do suprimento de K na solução nutritiva, quanto aos parâmetros morfológicos de parte aérea e das raízes de dois cultivares de cana-de-açúcar (SP90-3414 e SP83-2847), considerando os aspectos fisiológicos das trocas gasosas, as partições de K^+ , de sódio (Na^+) e de açúcares, bem como as respectivas manutenções hídricas das plantas (potencial de água na folha [Ψ_a]), em função das eficiências de absorção ($KUpE$) e utilização de K ($KUtE$). As plantas foram cultivadas em solução nutritiva (pH= $5,5 \pm 0,5$) com duas doses de K: 1,0 e 6,0 mmol L⁻¹. O acúmulo de K no cultivar SP90-3414 ocorreu preferencialmente nos colmos > folhas (FS + FI) > raízes, enquanto para o cultivar SP83-2847 foi: folhas (FS + FI) > colmo > raízes, em ambos os suprimentos. O acúmulo total de Na^+ no genótipo SP83-2847 foi, respectivamente, 8% e 51% superior àquele observado no genótipo SP90-3414, nas doses de K de 1,0 e 6,0 mmol L⁻¹. Os maiores percentuais de AST e de AR em ambos os genótipos e doses de K foram observados para os colmos > folhas (FS + FI) > raízes. Na menor dose de K, o percentual de AST no colmo do genótipo SP90-3414 foi 40% maior em relação ao genótipo SP83-2847. O cultivar SP83-2847 apresentou maiores valores de área foliar total quando desenvolvido em baixa dose de K, porém mostrou-se menos responsivo ao incremento da disponibilidade de K no substrato quando comparado ao cultivar SP90-3414. Para as doses de K de 1,0 mmol L⁻¹, o comprimento total de raízes do genótipo SP83-2847 foi 18% superior aquele do genótipo SP90-3414. Por outro lado, para o maior suprimento de K, a superfície total de raízes do cultivar SP90-3414 foi 22% superior àquela do genótipo SP83-2847. No mais baixo suprimento de K, o genótipo SP83-2847 reduziu o consumo de água em 20% em relação ao SP90-3414, mesmo apresentando aumento de 119% na taxa de transpiração em relação ao genótipo suscetível SP90-3414. A condição hídrica das plantas variou apenas com o cultivar estudado, sendo o SP83-2847 aquele com maior capacidade de manutenção do volume hídrico foliar, independentemente das doses de K. Os comportamentos dos cultivares permitiram identificar o cultivar SP83-2847 como sendo de baixa exigência nutricional comparado ao cultivar SP90-3414.

Palavras-chave: *Saccharum* spp., eficiência nutricional, taxa fotossintética.

MORPHOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL RESPONSES OF TWO SUGARCANE GENOTYPES DEVELOPED IN LOW POTASSIUM SUPPLY

Abstract

Potassium (K) nutritional requirements for sugarcane are relatively higher. However, genotypes differ in their K uptake efficiency (KUpE) and utilization efficiency (KUtE), which promotes differences in their growth. Thus, morphological and physiological changes studies by differences in K availability are important for genotypes breeding. In this experiment were evaluated the morphological and physiological changes in two different genotypes (SP90-3414 and SP83-2847) modulated by the K supply in nutrient solution. The physiological gas exchange, K^+ , sodium (Na^+) and sugars partitions, as well as the plant water maintenance (Ψ_a , leaf water potential) in function of the KUpE and KUtE were considered. Plants were grown in nutrient solution ($pH = 5.5 \pm 0.5$) with two K levels: 1.0 and 6.0 $mmol L^{-1}$. The K accumulation in the SP90-3414 genotype occurred mainly in stems > leaves (FS + FI) > roots, while for the SP83-2847 genotype was: leaves (FS + FI) > stem > roots, in both K supply. Total Na^+ accumulations in SP90-3414 genotype were 8% and 51% higher than that observed for SP83-2847 genotype, respectively, at low and adequate K level. The highest percentages of total soluble (TSS) and reduced sugars (RS), in both genotypes and K levels, were observed for stems > leaves (FS + FI) > roots. At lower K supply, TSS percentages in SP90-3414 stem was 40% higher compared to SP83-2847 genotype. The total leaf area was higher in SP83-2847 genotype when developed in low K level, but proved to be less responsive than the SP90-3414 when K-supply was increased in nutrient solution. Despite, SP90-3414 genotype presented 22% higher total root surface than SP83-2847, at K rate of 1.0 $mmol L^{-1}$, the total root length in SP83-2847 genotype was 18% higher than the SP90-3414. At low K level, the SP83-2847 genotype reduced their water consumption in 20% when compared to SP90-3414 genotype, even though its transpiration rate has increased in 119%. The plants water status varied only with the genotypes, when the SP83-2847 showed the greatest ability to maintain the leaf water volume, regardless of K levels. The behavior of genotypes have identified the SP83-2847 genotype as low strain nutritional than SP90-3414.

Keywords: *Saccharum* spp., nutritional efficiency, photosynthetic rate.

3.1 Introdução

A adequada disponibilidade de K no meio de crescimento é um importante fator para o bom desenvolvimento das plantas, pois como elemento essencial, sua ausência impede os vegetais de completarem seu ciclo. Existem diferenças genotípicas na resposta da cana-de-açúcar ao K (WOOD; SCHROEDER, 2004), embora, no Brasil existam poucos estudos que definam aquelas mais responsivas a esse elemento. A demanda nutricional das plantas pode variar muito, principalmente, em função do estágio de desenvolvimento, do genótipo utilizado e do nível de suprimento de K empregado (HANWAY; JOHNSON, 1985). No início do desenvolvimento das plantas, os tecidos formados na fase vegetativa como raízes, caules e folhas, demandam maior quantidade de K oriundo do substrato, no entanto, na fase reprodutiva, boa parte do K acumulado é proveniente da redistribuição desse nutriente, principalmente de órgãos de residência, como as folhas (MALAVOLTA, 2005).

A taxa de absorção de K^+ pelas raízes é coordenada pelo conteúdo de K^+ nos tecidos, ou seja, o aumento do conteúdo de K^+ nos tecidos favorece a redução da absorção desse elemento pelas raízes (SIDDIQI; GLASS, 1982; GLASS, 1983), sendo que quando a concentração de K^+ na solução externa é aumentada, a taxa de absorção de K^+ é elevada proporcionalmente, porém, em altas concentrações de K^+ , os sítios de absorção desse nutriente tornam-se totalmente preenchidos, saturando a taxa de absorção de K^+ (LEONARD, 1985). Após o contato íon-raiz, o K^+ é absorvido com o auxílio de transportadores por meio de canais específicos, localizados na membrana plasmática das células da epiderme radicular (MAATHUIS; SANDERS, 1997). Esses canais presentes na membrana plasmática são simples e caracterizados por uma curta seção na região dos poros, a qual coordena a seletividade do K^+ (HILLE, 1996). Há relatos da ocorrência de canais na membrana direcionados para a parte interior e exterior das células, nos quais o íon K^+ segue o potencial elétrico da membrana plasmática (POTTOSIN; ANDJUS, 1994), podendo ainda ocorrer a extrusão de íons de hidrogênio (H^+) para fora da célula (LÖPPERT, 1983), especialmente em células do sistema radicular (LEONARD, 1985), com intuito de manter o potencial elétrico celular. Basicamente existem dois sistemas de transporte de K^+ (MALAVOLTA, 2005; MEURER, 2006; EPSTEIN; BLOOM, 2006). O primeiro, denominado mecanismo 1 ou HATs (*high-affinity transport system*), atua a baixas concentrações de K na solução externa, ou seja, possui alta afinidade e seletividade no transporte de K^+ . Para esse sistema, a absorção de K^+ ocorre via simporte K^+/H^+ (RUBIO; GASSMAN; SCHROEDER, 1995) e ambos os íons são transportados juntos por meio da membrana plasmática até o citosol (ROSOLEM, 2005). A proteína facilitadora do transporte de alta afinidade (HKT1) é provavelmente um

co-transportador K^+/H^+ e apresenta uma ordem de seletividade de $K^+ > Cs^+ > Rb^+ > Na^+ > NH_4^+$ (SCHACHTMAN; SCHROEDER, 1994). Já o segundo sistema, conhecido como mecanismo 2 ou LATs (*low-affinity transport system*), opera sob altas concentrações de K^+ , podendo ainda estar sujeito à interferência de outros íons (ROSOLEM, 2005). Este último sistema transporta K^+ por difusão facilitada pelos canais seletivos até o citosol (FOX; GUERINOT, 1998).

Devido ao impedimento da via apoplástica causado pelas estrias de Cáspari na região da endoderme, o K^+ , após ser absorvido, é transportado via simplástica até o xilema (MALAVOLTA, 2005), essa comunicação ocorre devido à presença de um canal contínuo, denominado plasmodesmos, que se inicia desde as células superficiais das raízes percorrendo a endoderme até atingir o xilema (LÄUCHLI; PFLÜGER, 1978; BARBERON; GELDNER, 2014), permitindo, finalmente, que os íons K^+ sejam transportados para órgãos de residência. Esse transporte inicial tem caráter ativo e é coordenado pelo potencial eletroquímico entre células do xilema e as células parenquimáticas (LÄUCHLI; PFLÜGER, 1978). A movimentação do K^+ no interior da planta pode ocorrer via apoplasto e simplasto, seguindo a corrente transpiratória das plantas (MALAVOLTA, 2005; BARBERON; GELDNER, 2014).

No floema, o K^+ é o cátion mais abundante (VIRO; HAEDER, 1971; MENGEL, 1985), apresentando concentrações entre 60 a 110 mmol L⁻¹ (MARTIN, 1989), desempenhando importante papel no transporte de compostos orgânicos, como o malato às raízes, que posteriormente é reciclado via xilema juntamente com o nitrato (NO_3^-) até a parte aérea (BEN-ZIONI; VAADIA; LIPS, 1971; MENGEL, 1985; MARSCHNER, 2012). Adicionalmente, este nutriente move-se rapidamente para outros órgãos como folhas novas, frutos e grãos, os quais atuam como forte dreno fisiológico (MENGEL, 1985; MARTIN, 1989; MALAVOLTA, 2005), justificando o fato do K ser facilmente redistribuído de um órgão de residência para outro órgão de formação. A redistribuição do K^+ pela planta é evidenciada visualmente a partir dos sintomas de deficiência do elemento em folhas velhas, caracterizados inicialmente por clorose e posterior necrose das margens foliares, associada à diminuição do teor do nutriente neste órgão (BERINGER; NOTHDURFT, 1985; MALAVOLTA, 2005). Os sintomas típicos de deficiência de K são decorrentes, por exemplo, da redução da síntese proteica, provocando acúmulo de aminoácidos como ornitina, citrulina e arginina, os quais são precursores da poliamina putrescina, composto nitrogenado tóxico as plantas (FARIDUDDIN, 2013).

Devido a participação do K na redistribuição dos carboidratos sintetizados, no processo fotossintético, na síntese proteica e na ativação enzimática (MENGEL; KIRKBY, 2001, EPSTEIN; BLOOM, 2005; MARSCHNER, 2012), diferentes concentrações desse elemento no tecido vegetal podem provocar diferenças na morfologia, tais como variações na produção de massa seca vegetal, na área foliar, no comprimento e superfície radicular, no acúmulo de açúcares nos diferentes tecidos; e no comportamento fisiológico das plantas, como, alterações na taxa fotossintética, na transpiração e condutância estomática (WHITE, 2013). Nesse contexto, objetivou-se avaliar os aspectos morfológicos, a produção de massa seca e as concentrações de K em dois cultivares de cana-de-açúcar, considerando o fornecimento de duas doses de K em solução nutritiva.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Local, período e espécie vegetal

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada no Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP), em Piracicaba - SP, no período de abril a dezembro de 2013. A espécie estudada foi a cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) e os cultivares selecionados para estudo foram: SP90-3414 e SP83-2847.

3.2.2 Instalação, desenvolvimento e delineamento experimental

As plantas foram obtidas a partir do plantio de mini toletes com gemas individuais, em bandejas rasas contendo vermiculita umedecida com água deionizada. Após 30 dias as mudas foram transplantadas para vasos plásticos, com tampa, e com capacidade de 6 L contendo 5,5 litros de solução nutritiva (EPSTEIN; BLOOM, 2006) completa e diluída a 1/5 (denominada “solução de adaptação”) da concentração usual (tabela 1). Após uma semana nessa “solução de adaptação”, a solução foi trocada de acordo com os tratamentos (100% da força iônica), sendo as plantas fixadas com espuma plástica e mantidas sob aeração constante, sendo mantido apenas o perfilho primário para eliminação de efeitos varietais originados pelo perfilhamento.

Os tratamentos consistiram em duas doses de K, sendo uma delas a recomendada (6 mmol L^{-1}) e uma baixa (1 mmol L^{-1}) e dois cultivares de cana-de-açúcar (tolerante – SP83-2847 e suscetível – SP90-3414). Foram mantidas constantes a relação 60 : 40 entre N-NO_3^- e N-NH_4^+ em todas as soluções empregadas nas unidades experimentais (KIM; HAWNKINS; MITCHELL, 2010). Durante o desenvolvimento do trabalho, as soluções nutritivas foram

diariamente monitoradas e seus volumes completados com água deionizada e, renovadas a cada 7 dias.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos completos ao acaso, com os tratamentos arranjados em esquema fatorial 2 x 2 (duas doses de K x dois cultivares), com cinco repetições, totalizando 20 vasos.

Tabela 1 – Composição da solução nutritiva utilizada para o cultivo de cana-de-açúcar e volumes (mL L⁻¹) pipetados da solução estoque utilizados em cada tratamento

Solução estoque	Tratamentos	
	6 mmol K L ⁻¹	1 mmol K L ⁻¹
NH ₄ NO ₃ (1 mol L ⁻¹)	4,0	4,0
Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O (1 mol L ⁻¹)	4,0	4,0
MgSO ₄ .7H ₂ O (1 mol L ⁻¹)	1,0	1,0
NaH ₂ PO ₄ .H ₂ O (1 mol L ⁻¹)	1,0	1,0
KH ₂ PO ₄ (1mol L ⁻¹)	1,0	1,0
KCl (1mol L ⁻¹)	5,0	-
Micronutrientes* ⁽¹⁾	1,0	1,0
Fe-EDTA ⁽²⁾	1,0	1,0

Fonte: Epstein; Bloom, 2006. (1) em g L⁻¹ KCl (3,728) [50 μmol L⁻¹]; H₃BO₃ (1,546) [25 μmol L⁻¹]; MnSO₄.H₂O (0,338) [2 μmol L⁻¹]; ZnSO₄.7H₂O (0,575) [2 μmol L⁻¹]; CuSO₄.5H₂O (0,125) [0,5 μmol L⁻¹]; H₂MoO₄ (85% MoO₃) (0,081) [0,5 μmol L⁻¹]. (2) Dissolveu-se 33,2 g de EDTA-2Na em 200 mL de H₂O deionizada. Juntou-se agitando, 89 mL de NaOH 1mol L⁻¹ (40 g L⁻¹); Dissolveu-se separadamente, 24,9 g de FeSO₄.7H₂O em 200 mL de H₂O deionizada e juntou-se, agitando a solução de EDTA [53,7 μmol L⁻¹]. Completou-se para 900 mL com H₂O deionizada; colocou-se em frasco escuro, arejando durante uma noite e completou-se a 1 L com H₂O deionizada; manteve-se o frasco escuro em geladeira.

3.2.3 Coleta do material vegetal e avaliações de parâmetros produtivos da parte aérea

A coleta do material vegetal ocorreu aos 243 dias após o início dos tratamentos (DAT) – utilização das soluções com 100% da força iônica, item 3.2.2 – quando foram identificados e separados em folhas da parte superior (FS), compostas pelas folhas 0, +1, +2 e +3; folhas da parte inferior (FI), compostas pelas demais folhas maduras e senescentes; colmo e raízes. Em seguida, as lâminas foliares (FS + FI) tiveram suas áreas foliares (AF) quantificadas com o auxílio do integrador de área foliar LICOR[®], modelo LI-3100. Posteriormente, todo o material vegetal foi colocado em sacos de papel previamente identificados e secados por 72 horas em estufa, com circulação forçada de ar, a 65°C. Por fim, foi pesado, triturado em moinho tipo Wiley (peneira com diâmetro de malha de 1 mm) para determinação das concentrações de potássio e sódio.

3.2.4 Avaliações de parâmetros produtivos e morfológicos do sistema radicular

Durante o período de coleta do material vegetal separaram-se aproximadamente 20% de massa fresca total de raiz, de cada unidade experimental, para avaliação do comprimento e superfície radiculares (LAVRES JUNIOR; MONTEIRO, 2003). Essas subamostras foram coradas com solução de genciana (50 mg L⁻¹) e armazenadas em geladeira ± 10°C (NOORDWIJK; FLORIS, 1979). Posteriormente as raízes foram colocadas em lâminas transparentes (3M[®], 210 x 297 mm), evitando-se sobreposição, e digitalizadas com o auxílio de *scanner* HP[®] Scanjet 2400. O comprimento e a superfície radiculares foram determinadas por meio do aplicativo SIARCS (Sistema Integrado para Análise de Raízes e Cobertura do Solo) versão 3.0.

Após a determinação do comprimento e superfície radiculares, as subamostras foram colocadas em estufa de circulação forçada de ar, a 65°C por 72 horas pra secagem, sendo os valores de produção de massa seca somados ao material radicular pesado anteriormente. Os valores totais de comprimento e superfície radiculares foram expressos por meio de regra de três direta entre os valores da massa seca da subamostra com a massa seca total de raízes.

3.2.5 Concentração e acúmulo de potássio e sódio

A determinação da concentração de K e sódio (Na) nos tecidos vegetais (FS, FI, colmo e raiz) foi realizada utilizando-se 0,25 g de material vegetal seco e moído por meio da digestão nitro-perclórica (HNO₃:HClO₄, 83%:17%, 5:1 v/v) (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). A determinação da concentração de K ocorreu pelo método de fotometria de chama de emissão, enquanto que para o Na a leitura do extrato foi realizada por meio de espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).

O acúmulo desses elementos no tecido vegetal foi obtido pelo produto da concentração de K e Na e a produção de massa seca, sendo:

$$Ac_{\text{tecido}} (\text{mg}) = \text{concentração do elemento no tecido} (\text{mg kg}^{-1}) \times \text{massa seca} (\text{g})$$

3.2.6 Determinação dos açúcares solúveis totais e açúcares redutores

A extração dos açúcares ocorreu em duas etapas, sendo realizada para todos os tecidos vegetais separados (FS, FI, raiz e colmo) e secos (MS), em todas as unidades experimentais. Inicialmente, 5 mL de água deionizada foram adicionadas a 100 mg de MS, sendo agitada vigorosamente com auxílio de um vortex. A mistura foi incubada em banho-maria a 60°C por 30 minutos, seguida por centrifugação a 3000 g por 15 minutos e coletado o sobrenadante como extrato 1. Na segunda etapa, o sedimento foi submetido novamente à mesma extração e

o sobrenadante foi coletado como extrato 2. Os extratos 1 e 2 foram misturados gerando o extrato final (DE OLIVEIRA, 2007).

A determinação dos açúcares solúveis totais (AST) foi realizada pelo método fenol-sulfúrico (DUBOIS et al., 1956). Adicionou-se 0,5 mL de solução de fenol 5% e 2,5 mL de ácido sulfúrico concentrado em 0,5 mL de extrato (diluído de zero a dez vezes conforme os teores de AST), após a reação as amostras foram resfriadas a temperatura ambiente e posteriormente ocorreu-se a leitura colorimétrica em espectrofotômetro modelo “*ultrospec 2100 pro*” a 490 nm. Os teores de AST foram calculados pela interpolação dos resultados na curva padrão de glicose.

Para determinação dos açúcares redutores (AR) utilizou-se o método de “Somogyi e Nelson” descrito por Nelson (1944), modificado. O reagente de *Somogyi* foi preparado dissolvendo-se 28 g de $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ mais 40 g de tartarato duplo de sódio e potássio em 700 mL de água deionizada. Posteriormente adicionaram-se 100 mL de NaOH 1N e, sob agitação constante, gotejaram-se 80 mL de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ a 10%, dissolveram-se 180 g de NaSO_4 anidro, aferindo o volume para 1 L. A solução foi acondicionada em frasco escuro e ficou em repouso durante 48 horas, para posterior utilização. O reagente de *Nelson* foi preparado dissolvendo-se 50 g de $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ em 450 mL de água deionizada. Cuidadosamente, adicionaram-se 56 mL de ácido sulfúrico concentrado e acrescentaram-se 6 g de $\text{Na}_2\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ dissolvidos em 50 mL de água deionizada. O volume foi aferido para 1 L, acondicionado em frasco escuro, ficando em repouso por 48 horas.

A determinação dos AR ocorreu adicionando 1 mL do reagente de *Somogyi* em 1 mL do extrato (diluído de zero a dez conforme os teores de AR) e posterior incubação em banho-maria a 95°C por 10 minutos. Após o resfriamento à temperatura ambiente acrescentou-se 1 mL do reagente de *Nelson*. A solução colorida, resultante da reação, foi analisada em espectrofotômetro modelo “*ultrospec 2100 pro*” a 520 nm. Os teores de AR foram calculados pela interpolação dos resultados na curva padrão de glicose.

3.2.7 Eficiência de absorção e de uso de potássio

A eficiência de absorção (*KUpE*) foi calculada a partir da fórmula descrita por Swiader, Chyan e Freiji (2004):

$$KUpE \text{ (mg g}^{-1}\text{)} = \text{acúmulo total do nutriente (mg) / massa seca do sistema radicular (g)}$$

A eficiência de utilização do potássio (KU_tE) foi calculada a partir da fórmula descrita por Siddiqi e Glass (1981):

$$KU_tE \text{ (g}^2 \text{ mg}^{-1}\text{)} = \text{massa seca do tecido (g}^2\text{)} / \text{acúmulo do nutriente no tecido (mg)}$$

3.2.8 Eficiência de uso de água

A eficiência de uso de água (EUA) foi calculada por duas maneiras (ERICE et al., 2011):

(1) A eficiência de uso de água (fotossintética) foi determinada pela relação entre a taxa de assimilação de CO_2 (A) e a taxa de transpiração (E), determinadas pelo *IRGA LI-6.400XT* (WANG; GAO, 2001).

$$EUA^{(1)} \text{ (}\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}\text{)} = A \text{ (}\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{)} / E \text{ (mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{)}$$

(2) A segunda maneira utilizada para o cálculo da eficiência de uso de água (produção bruta) foi efetuada por meio da relação entre a produção de massa seca das plantas e o consumo total de água utilizado pelas mesmas (GRZEBISZ et al., 2013).

$$EUA^{(2)} \text{ (g de MS L}^{-1}\text{)} = \text{massa seca (g)} / \text{consumo de água (L)}$$

3.2.9 Taxa de assimilação de CO_2 , condutância estomática e transpiração

Para avaliar a taxa de assimilação de CO_2 , condutância estomática e transpiração, foi utilizado um analisador portátil de gases por infravermelho (*Infrared Gas Analyser – IRGA, LI 6400, Li-Cor, Inc., Lincon, NE, USA*). O fornecimento de CO_2 foi de aproximadamente $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$. A intensidade luminosa foi de $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, com temperatura de folha mantida em 30°C . A avaliação foi efetuada no período da manhã – entre as 9:00 hrs e 11:00 hrs –, aos 233 DAT, na folha +3.

3.2.10 Consumo de água

O consumo de água foi calculado diariamente a partir de uma pipeta volumétrica, sendo o volume transpirado por vaso anotado e repostado diariamente com água deionizada. As medições e reposições foram realizadas no período da manhã e as leituras expressas em L.

3.2.11 Potencial da água na folha

As medições do potencial da água na folha (Ψ_a) foram realizadas aos 224 DAT na extremidade superior da folha +2 utilizando câmara de pressão de *Scholander (Soil Moisture*

Equipament, Santa Bárbara CA, USA). As medições foram efetuadas entre às 17:15 horas e 18:00 horas. As leituras foram expressas em MPa (MARTÍNEZ-FERNANDEZ et al., 2012).

3.2.12 Determinação da atividade da redutase do nitrato

O teste bioquímico da redutase do nitrato [E.C. 1.6.6.1] foi efetuado conforme metodologia descrita por Mulder; Boxma; Van Venn (1959), aos 224 DAT na folha +1. Uma amostra de 200 mg do tecido foliar foi picada e incubada, a uma temperatura de 35°C em banho-maria, por 2 horas em uma solução de KNO₃ em tampão fosfato pH 7,4. Após a incubação, uma alíquota de 1 mL do meio foi amostrada para análise de NO₂⁻. Adicionou-se 1 mL de ácido sulfanílico e HCl a 20% para paralisar a reação anterior e logo após adicionou-se 1 mL de alfa-naftalamina. O extrato líquido foi submetido à leitura em colorímetro com comprimento de onda a 560 nm para determinação da absorbância. A atividade da redutase do nitrato se deu em função da concentração de nitrito no extrato estabelecida por curva padrão (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Concentração e acúmulo de potássio nas folhas, colmo e raízes

A redução da concentração de K na solução nutritiva resultou em redução significativa da concentração de K nas lâminas foliares (figuras 1A e 1B). Observou-se que para o menor suprimento de K na solução, as concentrações desse elemento nas folhas da parte superior (FS) e da parte inferior (FI) reduziram em 10% e 14% e de 28% e 24%, respectivamente, para os cultivares SP90-3414 e SP83-2847. Considerando as diferenças entre cultivares verificou-se que, para as FS, o cultivar SP83-2847, quando submetido à dose de 6 mmol L⁻¹, apresentou concentração de K 6% maior em relação ao SP90-3414 (figura 1A). Porém, para as FI, para as duas doses de K (1 ou 6 mmol L⁻¹), as plantas do cultivar SP83-2847 aumentaram em 43% e 34%, respectivamente sua concentração de K (figura 1B).

O acúmulo de K nas FS diferiu significativamente para o cultivar SP90-3414, com a redução da concentração de K na solução nutritiva, proporcionando uma redução de 37% (figura 1C). Contudo, para as FI verificou-se que o menor suprimento de K na solução nutritiva resultou em diferenças significativas no acúmulo de K nos dois cultivares, com redução de 56% para o cultivar SP90-3414 e 43% para o SP83-2847 (figura 1D). Com relação as diferenças genotípicas de acúmulo de K nas FS, quando submetidas a menor dose, as plantas do cultivar SP83-2847 apresentaram aumento de 29% no acúmulo de K, porém

quando submetidas a maior dose, reduziram em 16%, comparado às plantas do cultivar SP90-3414 (figura 1C). Para as FI, somente houve diferença estatística de acúmulo quando as plantas foram submetidas a menor dose de K, nesse contexto o cultivar SP83-2847 acumulou 36% mais K em relação ao cultivar SP90-3414 (figura 1D).

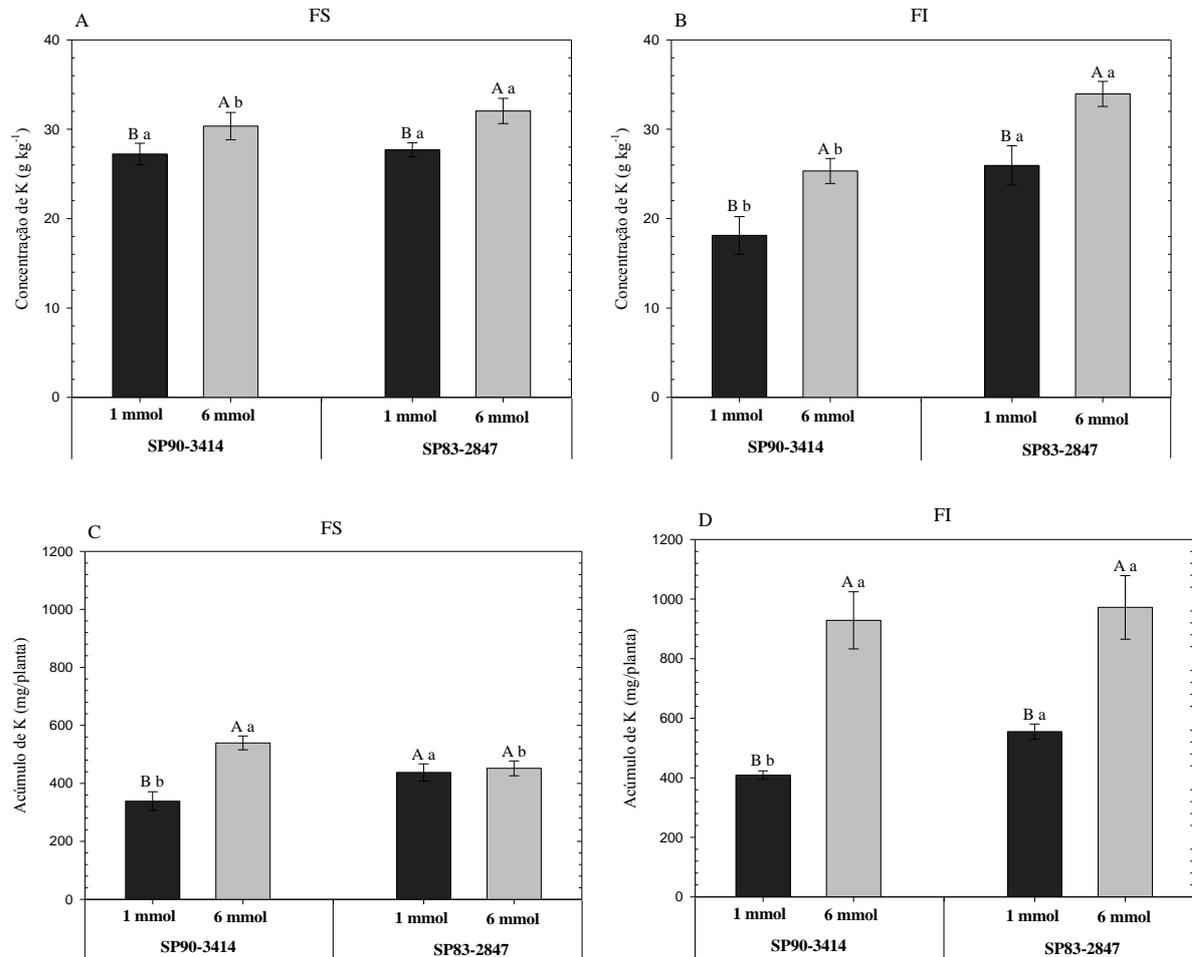


Figura 1 - Concentração de K em folhas superiores (A) e inferiores (B) e respectivo acúmulo (C e D) nos genótipos de cana-de-açúcar SP90-3414 e SP83-2847, em função do suprimento de K na solução nutritiva. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro do mesmo cultivar) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos dos cultivares (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

A redução da concentração de K na solução nutritiva resultou em redução de 23% na concentração de K nos colmos (figura 2A) no cultivar SP90-3414. Contudo, analisando o acúmulo de K resultante da redução no suprimento de K, verificou-se que para o cultivar SP90-3414 o acúmulo de K foi 53% menor, enquanto que para o cultivar SP83-2847 essa redução foi de 34% (figura 2B). Observam-se diferenças genotípicas apenas para o acúmulo de K, quando o cultivar SP90-3414 apresentou, para as doses de K de 1 e 6 mmol L⁻¹,

aumento de, respectivamente, 56% e 118% no acúmulo de K em relação ao cultivar SP83-2847 (figura 2B).

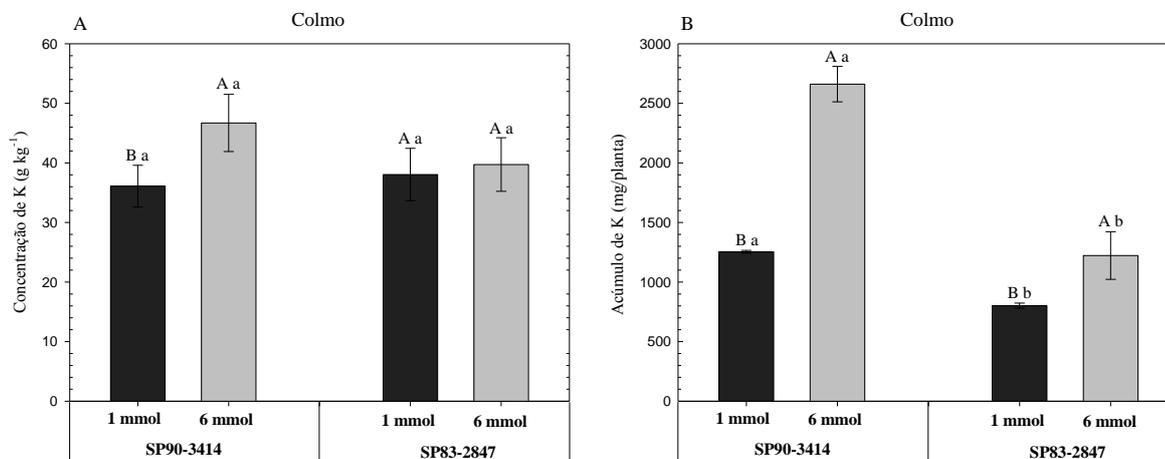


Figura 2 - Concentração (A) e acúmulo (B) de K no colmo nos genótipos de cana-de-açúcar SP90-3414 e SP83-2847, em função do suprimento de K na solução nutritiva. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro do mesmo cultivar) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos dos cultivares (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

As concentrações de K nas raízes dos cultivares SP90-3414 e SP83-2847 foram significativamente influenciadas pela redução da concentração de K na solução nutritiva. O cultivar SP90-3414 reduziu em 47% sua concentração de K, enquanto que no cultivar SP83-2847 esta redução foi de 48% (figura 3A). Entre os genótipos constatou-se apenas diferença estatística quando as plantas foram submetidas a maior dose, quando o cultivar SP90-3414 apresentou incremento de 28% na concentração de K nas raízes em relação ao SP83-2847 (figura 3A). Os valores de acúmulo de K nas raízes seguiram o mesmo comportamento verificado para aquele de concentração, ou seja, a redução da concentração de K na solução nutritiva promoveu diminuições de 63% e 58%, respectivamente, nos acúmulos de K no cultivar SP90-3414 e SP83-2847, sendo as diferenças genotípicas encontradas somente quando as plantas foram submetidas a maior dose de K. Por sua vez, o acúmulo observado no cultivar SP90-3414 foi 40% superior ao observado para o genótipo SP83-2847 (figura 3B).

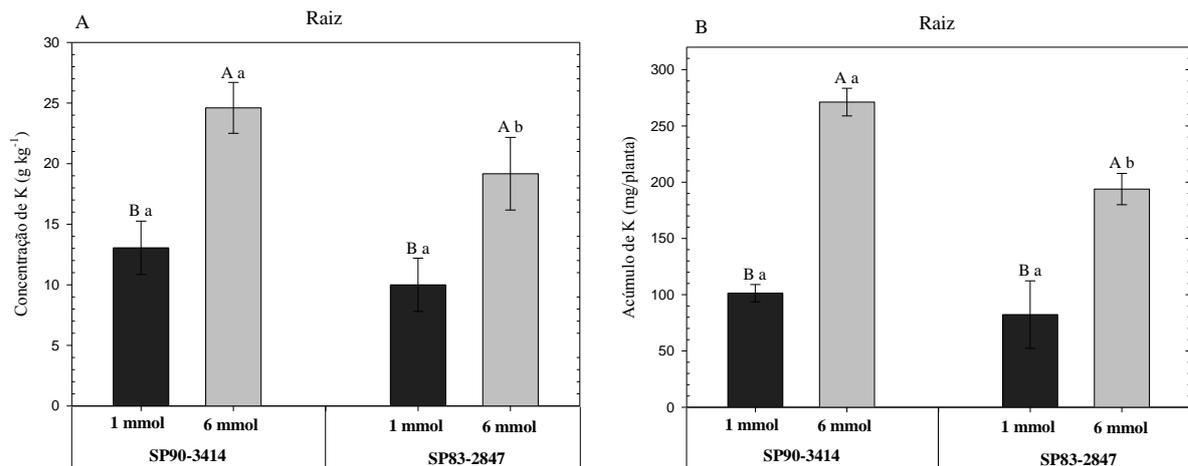


Figura 3 - Concentração (A) e acúmulo (B) de K na raiz nos genótipos de cana-de-açúcar SP90-3414 e SP83-2847, em função do suprimento de K na solução nutritiva. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro do mesmo cultivar) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos dos cultivares (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

O suprimento de K alterou as concentrações de K nos órgãos analisados, porém, seguindo o mesmo padrão em ambos os cultivares: colmo > FS > FI > raiz. O K⁺ é caracterizado por sua alta mobilidade nas plantas em todos os níveis – dentro das células individualmente, no interior dos tecidos e no transporte a longas distâncias – ou seja, no transporte (via xilema) e na redistribuição (via floema). O transporte do íon K⁺ a longas distâncias para os tecidos jovens (fonte), como as folhas, ocorre via xilema e floema em proporções semelhantes, porém sua redistribuição dentro da planta, principalmente para os órgãos reprodutivos ou de armazenamento (dreno), ocorre via floema (JESCHKE; PATE, 1991), sendo que aproximadamente 90% de todo o K é redistribuído (WHITE; BROADLEY, 2001; PEUKE, 2010). A absorção e o transporte de K⁺ ao longo da planta é facilitada por proteínas de alta e baixa afinidade (*HATs* e *LATs*, respectivamente) que permitem seu movimento através da membrana plasmática (MARSCHNER, 2012). Rosseto et al. (2004) estudaram os teores foliares de K em cana-de-açúcar submetidas a três níveis de adubação potássica (50, 100 e 200 kg ha⁻¹), em diferentes regiões do Estado de São Paulo, e encontraram concentrações foliares gradativamente maiores de acordo com o incremento da adubação, com valores variando de 8,5 g kg⁻¹, nas folhas das plantas com menor suprimento, e de 13 g kg⁻¹ para a maior dose. Adicionalmente, considerando que no manejo da cultura a fase reprodutiva é indesejada, e sendo o K o nutriente de maior extração pelos colmos, muitas pesquisas foram feitas ao longo dos tempos demonstrando que extração de K por este órgão resultou em valores de concentração que variaram de 1,1 g kg⁻¹ (GOLDEN, 1960) até

3,1 g kg⁻¹ (GOMES, 2003), dependendo dos cultivares estudados e das condições de desenvolvimento da planta.

A mobilidade do K quanto a redistribuição nas plantas, por meio do transporte de seiva elaborada pelo floema, a qual é constituída principalmente por sacarose, aminoácidos e alta concentração de K, está diretamente relacionada com a produção de massa seca dos órgãos vegetais (HAYASHI; CHINO, 1990), sendo esta redistribuição incrementada com o suprimento elevado desse elemento (PEEL; ROGERS, 1982). Porém, ainda não está claro se o efeito do K ocorre diretamente no mecanismo de carregamento dos compostos ao tubo crivado ou então, pelo aumento do potencial osmótico na seiva do floema, promovendo um aumento no fluxo desses compostos no tubo, o que estaria indiretamente ligado ao processo de transporte (MARSCHNER, 2012).

O acúmulo de K foi distinto entre os cultivares, ou seja, para o cultivar SP90-3414 seguiu-se o padrão colmo > folhas (FS + FI) > raiz, porém para o cultivar SP83-2847 o padrão foi: folhas (FS + FI) > colmo > raiz. Essa diferença se deve principalmente à baixa produção de massa seca de colmo pelo cultivar SP83-2847, que segundo a literatura é considerado genótipo rústico e de baixa exigência nutricional (DINARDO-MIRANDA; DE VASCONCELOS; LANDELL, 2010). Segundo Tasso Junior et al. (2007), as quantidades de nutrientes absorvidas do solo pela cana-de-açúcar variam de acordo com os métodos de cultivo, cultivares e disponibilidade de nutrientes, fato que aliado à relação entre disponibilidade de K no substrato e o transporte de carboidratos na planta pode gerar diferenças no acúmulo.

3.3.2 Concentração e acúmulo de sódio nas folhas, colmo e raízes

A redução da concentração de K na solução nutritiva promoveu diferenças significativas somente nas concentrações de sódio (Na) nas folhas inferiores (FI) do cultivar SP83-2847, resultando em uma diminuição de 25% (figura 4B). Porém, analisando a diferença genotípica entre os cultivares, verificou-se que a concentração de Na nas folhas superiores (FS) do cultivar SP83-2847 foi 33% maior quando as plantas foram submetidas à dose de K de 1 mmol na solução nutritiva (figura 4A). Para as FI, só houve aumento nos teores de Na quando as plantas foram submetidas à dose de K de 6 mmol L⁻¹, sendo a concentração do elemento benéfico no genótipo SP83-2847 53% maior em relação ao genótipo SP90-3414 (figura 4B).

O acúmulo de Na foi influenciado pela redução da concentração de K na solução nutritiva para os dois cultivares, tanto nas FS quanto nas FI (figuras 4C e 4D). Para as FS,

essa redução no suprimento de K resultou em redução de 23% no acúmulo de Na no cultivar SP90-3414 e de 7% no SP83-2847 (figura 4C). Para as FI, a redução foi de 47% para o cultivar SP90-3414 e de 18% para o SP83-2847 com a redução do suprimento de K na solução nutritiva (figura 4D). Com relação às diferenças genotípicas foi observado no menor suprimento de K que, tanto para as FS, quanto para as FI, o padrão de acúmulo de Na foi semelhante, ou seja, o cultivar SP83-2847 apresentou maiores valores de acúmulo de Na em relação ao SP90-3414, sendo 10% nas FS e 25% nas FI. Por outro lado, quando o suprimento de K na solução nutritiva foi de 6 mmol L⁻¹, o cultivar SP90-3414 apresentou maior acúmulo de Na nas FS e FI de 9% e 24%, respectivamente, em relação ao cultivar SP83-2847.

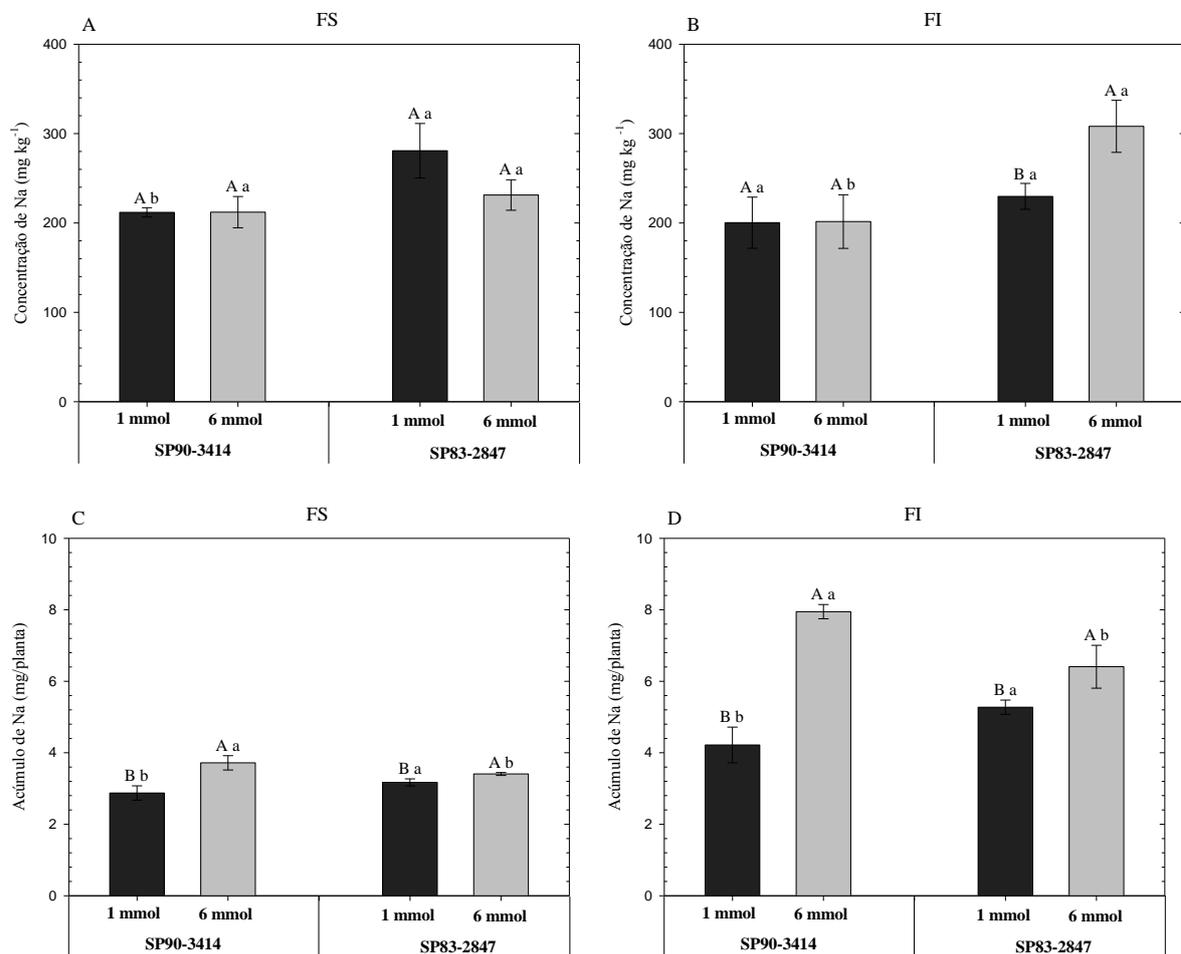


Figura 4 - Concentração de Na em folhas superiores (A) e inferiores (B) e respectivo acúmulo (C e D) nos genótipos de cana-de-açúcar SP90-3414 e SP83-2847, em função do suprimento de K na solução nutritiva. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro do mesmo cultivar) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos dos cultivares (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

Somente o cultivar SP90-3414 apresentou diferenças quanto à concentração de Na no colmo, em função do suprimento de K. A redução no fornecimento de K resultou em diminuição de 19% na concentração de Na no colmo do cultivar SP90-3414 (figura 5A). Entretanto, o acúmulo de Na nesse órgão foi significativamente distinto entre os dois cultivares com a redução da concentração de K na solução, resultando em diminuição de 52% no cultivar SP90-3414 e de 32% no SP83-2847 (figura 5B). Em relação aos resultados de acúmulo de Na no colmo, verificou-se que, tanto na dose de K de 1 mmol L⁻¹ quanto na dos 6 mmol L⁻¹, houve diferenças genotípicas, sendo o cultivar SP90-3414 o que apresentou maiores extrações, respectivamente, de 63% e 129%, em relação àquelas do cultivar SP83-2847 (figura 5B).

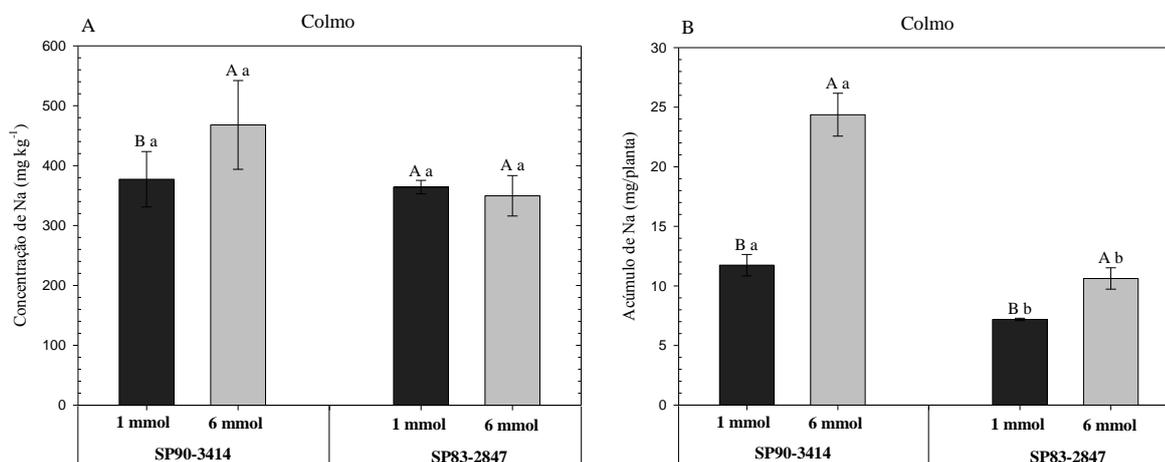


Figura 5 - Concentração (A) e acúmulo (B) de Na no colmo nos genótipos de cana-de-açúcar SP90-3414 e SP83-2847, em função do suprimento de K na solução nutritiva. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro do mesmo cultivar) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos dos cultivares (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

Diferentemente dos resultados observados para os outros órgãos, a concentração de Na nas raízes dos cultivares SP90-3414 e SP83-2847 aumentou de acordo com a redução da concentração de K na solução nutritiva (figura 6A), sendo esse aumento relativo a 57% no cultivar SP90-3414 e 68% no cultivar SP83-2847. Comparando-se os cultivares quanto ao teor de Na nas raízes, observa-se que somente há diferença significativa com o fornecimento da dose de K de 1 mmol L⁻¹ na solução nutritiva, sendo este valor 49% superior no genótipo SP83-2847 em relação ao SP90-3414 (figura 6A).

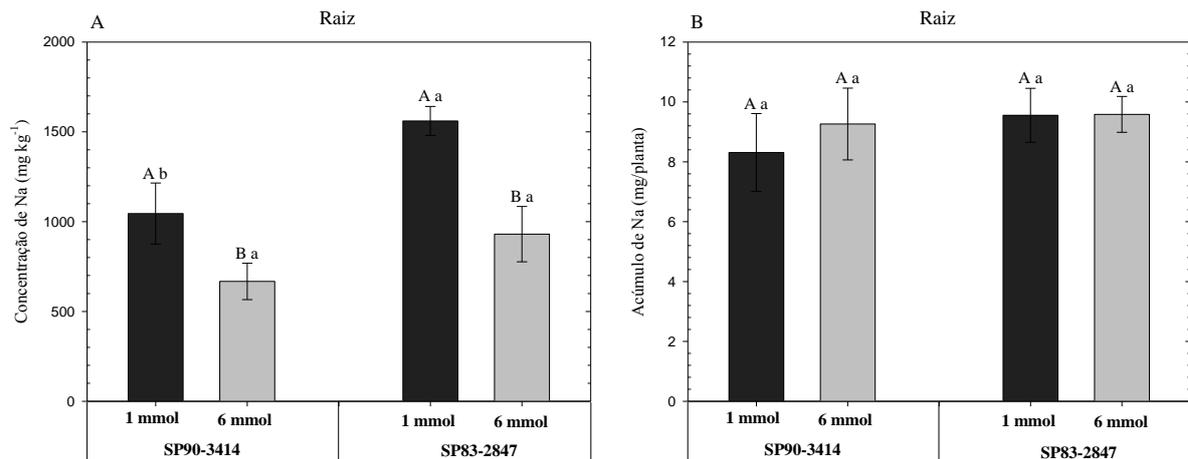


Figura 6 - Concentração (A) e acúmulo (B) de Na na raiz nos genótipos de cana-de-açúcar SP90-3414 e SP83-2847, em função do suprimento de K na solução nutritiva. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro do mesmo cultivar) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos dos cultivares (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

As plantas podem ser classificadas em quatro grupos de acordo com seu desenvolvimento em resposta ao Na: (1) grandes proporções de K podem ser substituídas por Na sem que ocorra redução do crescimento vegetal, nesse grupo a adição de Na pode estimular o desenvolvimento vegetal; (2) as plantas desse grupo apresentam respostas positivas com a adição de Na, porém de forma menos distinta comparado àquelas do primeiro grupo; (3) a substituição do K pelo Na ocorre de forma limitada, não apresentam incremento no desenvolvimento vegetal; e (4) o K não pode ser substituído pelo Na. No caso da cana-de-açúcar, assim como o milho e o feijão, essas espécies se encontram dentro do denominado grupo 4, sendo denominadas espécies natrofóbicas (MARSCHNER, 2012), ou seja, possuem taxas de crescimento similar na presença ou ausência de Na (HEWITT, 1983). Uma característica de plantas natrofóbicas é o baixo transporte de Na das raízes para a parte aérea das plantas, fato que pode ser verificado nos resultados do presente experimento, visto que a concentração de Na nos órgãos estudados seguiu a ordem raiz > FI > FS > colmo.

O restrito movimento ascendente de Na em plantas natrofóbicas, é causado pelo acúmulo seletivo de Na no parênquima das células do xilema (RAINS, 1969; DREW; LÄUCHLI, 1987; BLOM-ZANDSTRA; VOGELZANG; VEEN, 1998), juntamente com a redistribuição desse elemento para as raízes, promovendo maior concentração de Na nesse órgão. Jeschke e Pate (1991) demonstraram em estudos feitos com mamona que, o acúmulo seletivo e a redistribuição de Na para as raízes, reduziram a concentração desse elemento na seiva do xilema de 0,8 para 0,2 mM.

A deficiência nutricional de K provoca aumento na susceptibilidade das plantas ao estresse hídrico (CHOW; BALL; ABDERSON, 1990; DELGADO; SÁNCHEZ-RAYA, 1999), resultando uma perda da sua capacidade de regulação do fluxo de água, reduzindo conseqüentemente o transporte de Na. Isso explica o fato de a concentração de Na nas folhas ser maior nos tratamentos com suprimento adequado de K na solução nutritiva. Outro resultado que confirma esse argumento é o fato da transpiração ter sido maior nos tratamentos com maior dose de K, 136% e 40% para os cultivares SP90-3414 e SP83-2847, respectivamente (figura 15A). Os resultados de acúmulo de Na demonstram que, o cultivar SP90-3414 quando submetido à dose de 6 mmol L⁻¹ apresenta o padrão de acúmulo semelhante: colmo > folhas (FS + FI) > raiz, já quando submetido a dose de K de 1 mmol L⁻¹ o padrão de acúmulo de Na muda para colmo > raiz > folhas (FS + FI); sendo que essa inversão ocorre principalmente pela diferença na concentração de Na no tecido, pois com o suprimento adequado de K na solução nutritiva a massa seca de folhas e raízes é aumentada, porém a concentração de Na, como descrito anteriormente varia, aumentado nas folhas e diminuindo no sistema radicular.

3.3.3 Massa seca de folhas (FS + FI), colmo e área foliar total

A produção de massa seca de folhas (FS + FI) foi influenciada pela redução da concentração de K na solução nutritiva apenas para o cultivar SP90-3414 (figura 7A), o qual apresentou redução de 42% no rendimento de massa seca. Esse mesmo comportamento foi observado para o colmo, sendo que a redução do suprimento de K na solução nutritiva proporcionou, ao cultivar SP90-3414, redução de 38% na produção de massa seca desse órgão (figura 7B).

Considerando as diferenças genotípicas, verificou-se que para as folhas (FS + FI), apenas houve diferenças significativas entre os cultivares quando desenvolvidos em solução contendo 6 mmol L⁻¹ de K, em que o cultivar SP90-3414 aumentou o rendimento de massa seca em 41% (figura 7A). Porém, para a produção de massa seca de colmo, as diferenças genotípicas ocorreram para ambas as doses de K na solução nutritiva, em que o cultivar SP90-3414 se apresentou mais produtivo, com um aumento de rendimento de 82% para a dose de K de 1 mmol L⁻¹ e de 146% para a dose de 6 mmol L⁻¹, em relação ao cultivar SP83-2847, respectivamente.

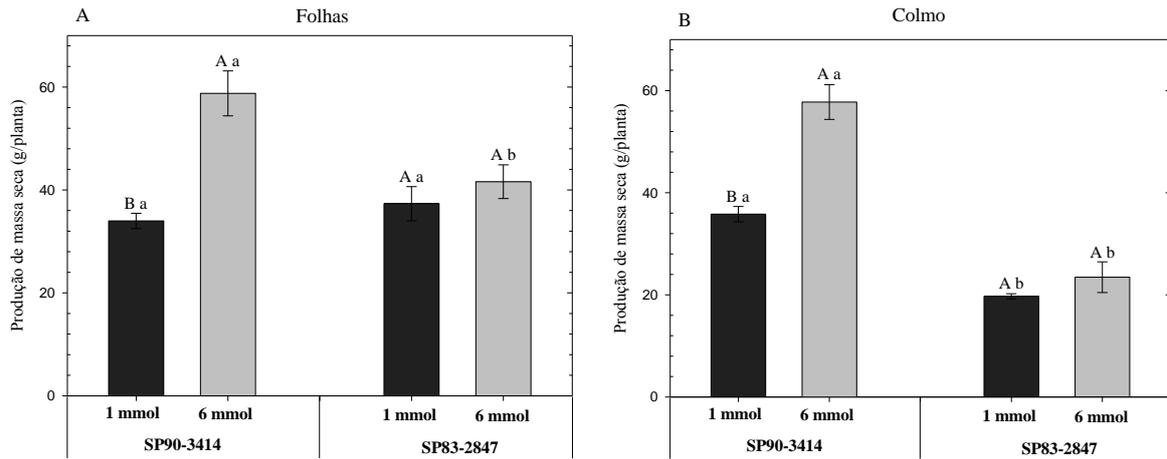


Figura 7 - Produção de massa seca das folhas (A) e colmo (B) nos genótipos de cana-de-açúcar SP90-3414 e SP83-2847, em função do suprimento de K na solução nutritiva. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro do mesmo cultivar) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos dos cultivares (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

A área foliar das plantas variou conforme a redução da concentração de K na solução nutritiva e conforme o cultivar estudado (figura 8). A redução no suprimento de K proporcionou uma diminuição de 63% da área foliar do cultivar SP90-3414 e 14% no genótipo SP83-2847. As diferenças genotípicas se apresentaram de forma diferente conforme a dose submetida. Ou seja, quando desenvolvido em baixa concentração de K na solução, a área foliar do cultivar SP83-2847 foi 112% superior àquela do SP90-3414, porém, quando submetido à maior dose de K, a área foliar desse cultivar foi 13% menor comparado ao do cultivar SP90-3414, indicando maior eficiência de uso do K (*KU_tE*) no genótipo SP83-2847 em relação ao SP90-3414, na menor dose de K.

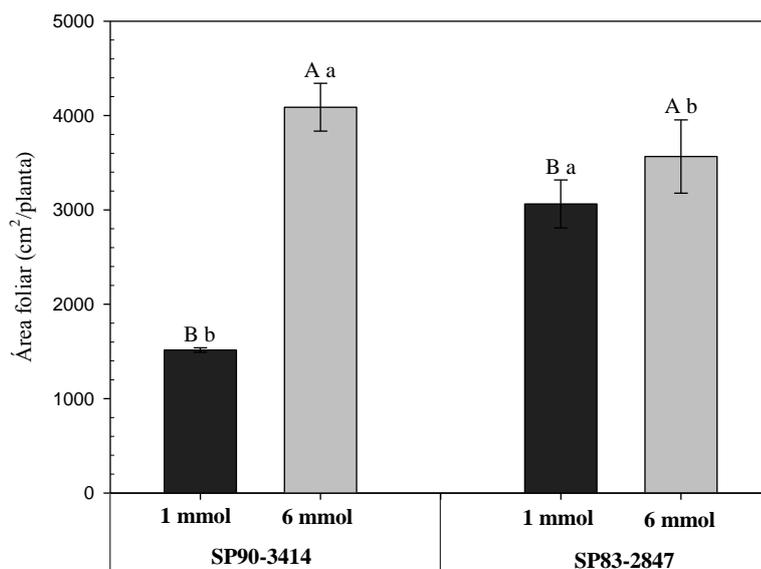


Figura 8 - Área foliar total nos genótipos de cana-de-açúcar SP90-3414 e SP83-2847, em função do suprimento de K na solução nutritiva. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro do mesmo cultivar) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos dos cultivares (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

A partir dos resultados fica evidente a diferente resposta dos genótipos estudados a concentração de K na solução nutritiva. O cultivar SP83-2847 é caracterizado pela sua menor exigência nutricional (DINARDO-MIRANDA; DE VASCONCELOS; LANDELL, 2010), desenvolvendo-se bem tanto em ambientes com certa restrição nutricional quanto em ambientes férteis, explicando o fato da produção de massa seca de folhas e colmo não ser significativamente reduzida com o baixo suprimento de K, indicando mais uma vez a eficiência quanto ao uso de K (*KUtE*), porém não sendo um genótipo responsivo quanto à adição de K – eficiente e não responsivo (FAGERIA et al., 1997; FAGERIA, 2000). Porém, o cultivar SP90-3414 é caracterizado pela necessidade de ambiente, pelo menos, moderadamente fértil para seu desenvolvimento, apresentando altas produções quando desenvolvido em condições de disponibilidade nutricional (BELTRAME, 2005), confirmando o aumento de produção de biomassa de folhas e colmo quando submetido a concentração ideal de K na solução nutritiva, comparada àquela com baixa concentração. Otto, Vitti e Luz (2010) estudaram a resposta do cultivar SP90-3414 ao manejo da adubação potássica no município de Piracicaba/SP e encontraram efeito significativo das doses de K aplicadas, promovendo acréscimo da ordem de 18 t ha⁻¹ entre a dose que proporcionou a maior produtividade de colmos (130 kg ha⁻¹) e o tratamento controle.

Diferenças na produção de massa seca das folhas resultam, também, em diferenças na área foliar das plantas (figuras 7A e 8). Os efeitos da adubação potássica na área foliar foram

estudados ao longo dos anos e para muitas culturas, tais como trigo (RAMA RAO, 1986), algodão (XI et al., 1989; ZHAO; OOSTERHUIS; BEDNARZ, 2001) e soja (SHARMA; KUMARI, 1996; ITOH; YAMAGISHI; ISHII, 1997), demonstrando-se um efeito positivo do suprimento de K na nutrição das plantas com o aumento da área foliar dessas culturas. Jordan-Meille e Pellerin (2004) estudando o efeito da adubação potássica na cultura do milho observaram que, em dois anos de ciclo (2000 e 2001), houve decréscimo de 45% da área foliar verde da cultura submetida à deficiência de K, no primeiro ano de cultivo e de 60% no segundo ano. Esses autores também observaram redução de aproximadamente 20% na taxa de alongamento foliar nos tratamentos com menor suprimento de K, em relação às plantas bem supridas com K.

A área foliar está diretamente relacionada com o comprimento foliar, e em plantas deficientes em K a redução desses parâmetros deve-se, principalmente, pela redução da taxa de alongamento foliar, o que estaria mais diretamente relacionado à alteração da relação de água na planta, do que pela própria redução na taxa de suprimento de carboidratos (GERARDEAUX et al., 2010). A extensão das células envolve a formação de um grande vacúolo ocupando de 80 a 90% do volume celular. Existem três principais requisitos para a extensão celular, sendo eles: (1) extensibilidade das células – rearranjo ou perda da parede celular existente, (2) síntese e deposição dos novos componentes formados na parede, e (3) o acúmulo de solutos para criar o potencial osmótico interno necessário para a pressão de turgor (MARSCHNER, 2012). Assim, a extensão celular não somente das folhas, mas também das raízes (DOLAN; DAVIES, 2004) é positivamente correlacionada com a concentração de K no citosol e vacúolo.

3.3.4 Massa seca de raízes, comprimento e superfície radicular

A produção de massa seca de raízes foi significativamente influenciada pelo suprimento de K somente para o cultivar SP90-3414 (figura 9). Neste genótipo, a redução da concentração de K na solução nutritiva resultou em decréscimo de 18% na produção de biomassa deste órgão. Por sua vez, não foi observada diferença na produção de massa seca de raízes entre os genótipos para ambas as doses de K (figura 9).

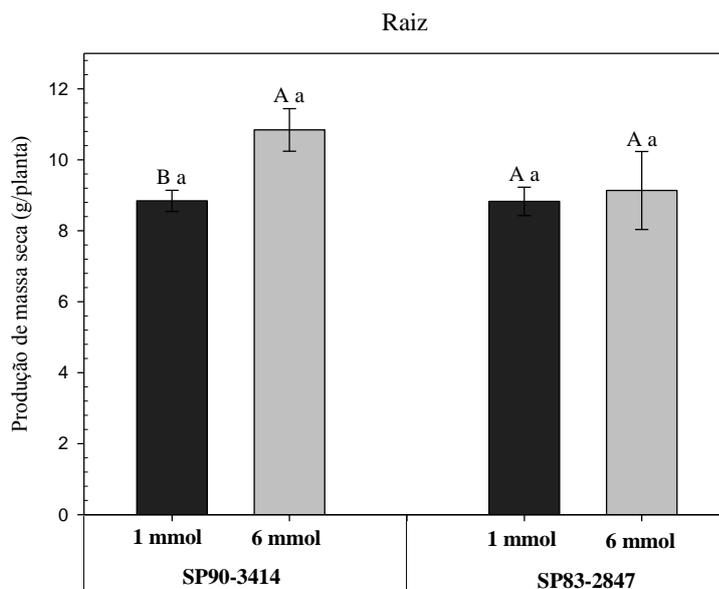


Figura 9 - Produção de massa seca de raízes nos genótipos de cana-de-açúcar SP90-3414 e SP83-2847, em função do suprimento de K na solução nutritiva. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro do mesmo cultivar) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos dos cultivares (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

A redução da concentração de K na solução nutritiva proporcionou diferenças significativas no comprimento e superfície total de raízes dos cultivares de cana-de-açúcar (figuras 10A e 10B). Decréscimo da ordem de 33% para o cultivar SP90-3414 e de 31% para o SP83-2847 foram encontrados para o parâmetro de comprimento radicular (figura 10A) com a redução do suprimento de K. Para a superfície total de raízes das plantas verificou-se decréscimo de 35% para o cultivar SP90-3414 e de 18% para o SP83-2847 com a redução do suprimento de K (figura 10B). Com relação às diferenças genotípicas, os cultivares diferiram quanto ao comprimento radicular apenas quando submetidos a dose de 1 mmol L⁻¹ de K, quando o cultivar SP83-2847 apresentou aumento de 18% (Figura 10A) em relação ao SP90-3414. Porém, considerando a superfície radicular, apenas houve diferença genotípica quando as plantas foram desenvolvidas em solução contendo 6 mmol L⁻¹ de K. Nessas condições, a superfície total de raízes do cultivar SP90-3414 foi 22% superior àquela do genótipo SP83-2847 (Figura 10B).

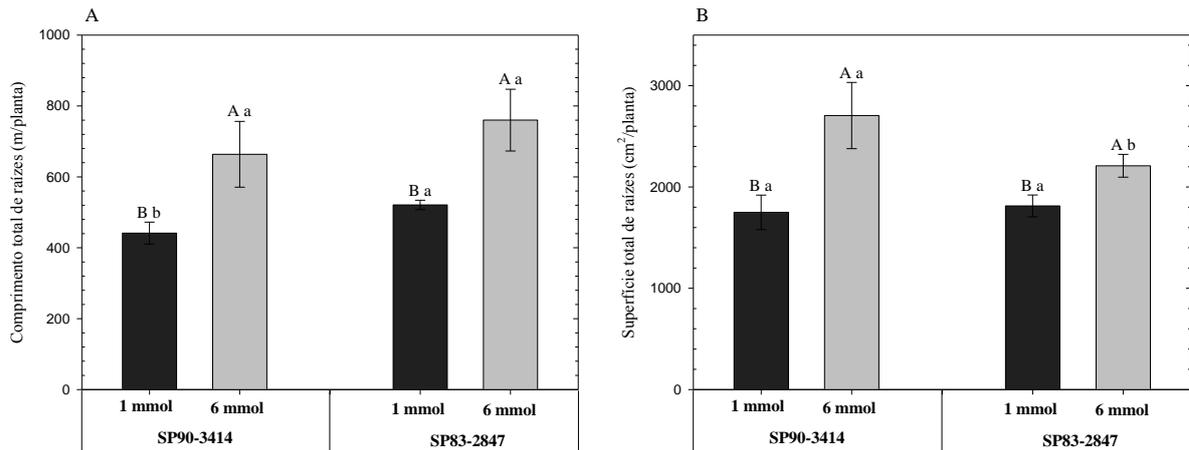


Figura 10 - Comprimento total (A) e superfície total (B) de raízes nos genótipos de cana-de-açúcar SP90-3414 e SP83-2847, em função do suprimento de K na solução nutritiva. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro do mesmo cultivar) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos dos cultivares (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

O sistema radicular foi o órgão que apresentou menor produção de massa seca neste estudo, fato este que exerce influência na absorção de água e nutrientes. Ou seja, em condições de deficiência de nutrientes, como o K e P, por exemplo, ocorre a redução na massa de raiz assim como no volume e distribuição lateral (HACKETT, 1968), como resultado da menor transferência de fotoassimilados (sacarose) da parte aérea para o sistema radicular (CAKMAK; HENGELER; MARSCHNER, 1994; MARSCHNER, 2012). Estudos demonstrando o efeito das baixas concentrações de K na partição de biomassa seca são amplamente difundidos e estudados ao longo do tempo, sendo que diversos autores demonstram o efeito negativo ocasionado pelas baixas concentrações disponíveis de K, na produção de massa seca radicular para diversas culturas, tais como trigo (TENNANT, 1976), feijão (CAKMAK; HENGELER; MARSCHNER, 1994; FAGERIA; BALIGAR; LI, 2008) e algodão (GERARDEAUX et al., 2010).

Possuir um sistema radicular vigoroso e extenso proporcionam as plantas explorar um maior volume (superfície radicular) e profundidade (comprimento radicular) de solo, absorvendo maiores quantidades de água e nutrientes, possibilitando assim, sob condições de deficiências nutricionais, incremento de produção de biomassa e eficiência de absorção dos nutrientes (MERRILL; TANAKA; HANSON, 2002). O comprimento e a superfície radicular estão diretamente relacionadas à exploração de um maior volume de solo, e os efeitos do suprimento de K no desenvolvimento radicular são amplamente relatados na literatura (FAGERIA; MOREIRA, 2011). Correlações positivas entre a eficiência de absorção de K e o

comprimento radicular foram reportadas para milho, colza e tomate (JUNGK, 2001). A taxa de difusão de K^+ é diretamente proporcional à superfície radicular (VILELA; ANGHINONI, 1984). Lavres Junior e Monteiro (2003) concluíram que o fornecimento de K e N para plantas de capim-Mombaça contribuiu para o aumento do comprimento e da superfície de raízes.

3.3.5 Porcentagem de açúcares totais e redutores

Analisando o percentual de açúcares solúveis totais (AST) e redutores (AR) presentes nas plantas (Figuras 11A e 11B), verificou-se que a distribuição desses açúcares segue o mesmo padrão, nos órgãos analisados, independente do tratamento, sendo: colmo > FI > FS > raiz. O percentual de AST do genótipo SP90-3414 aumentou nas folhas (FS + FI) e na raiz quando houve suprimento adequado de K na solução nutritiva. Por sua vez, o percentual de AST no colmo foi maior na condição de menor suprimento de K. Porém, o oposto foi verificado para o genótipo SP83-2847, ou seja, o suprimento adequado de K na solução nutritiva promoveu maior % de AST no colmo das plantas e redução nas folhas (FS + FI) e nas raízes. Considerando a diferença genotípica, verificou-se que, quando submetidos à dose de K de 1 mmol L^{-1} o cultivar SP90-3414 apresentou maior % de AST no colmo, porém quando submetida a dose de 6 mmol L^{-1} de K essa % diminuiu comparado ao cultivar SP83-2847. Já para as folhas (FS + FI) e raízes, o cultivar SP90-3414 apresentou maiores valores quando submetidos à dose de K de 6 mmol L^{-1} , e redução quando submetido a dose de 1 mmol L^{-1} comparado ao cultivar SP83-2847.

Os maiores percentuais de AR em ambos os genótipos foram observados para os colmos, correspondendo a cerca de 80% no SP90-3414 e de 60% no SP83-2847, em ambas as doses de K; seguidos pelas folhas (FS + FI) e, por fim, pelas raízes. Por outro lado, os % de AR nas folhas e raízes do genótipo SP83-2847 foram superiores àqueles observados para as folhas e raízes do genótipo SP90-3414.

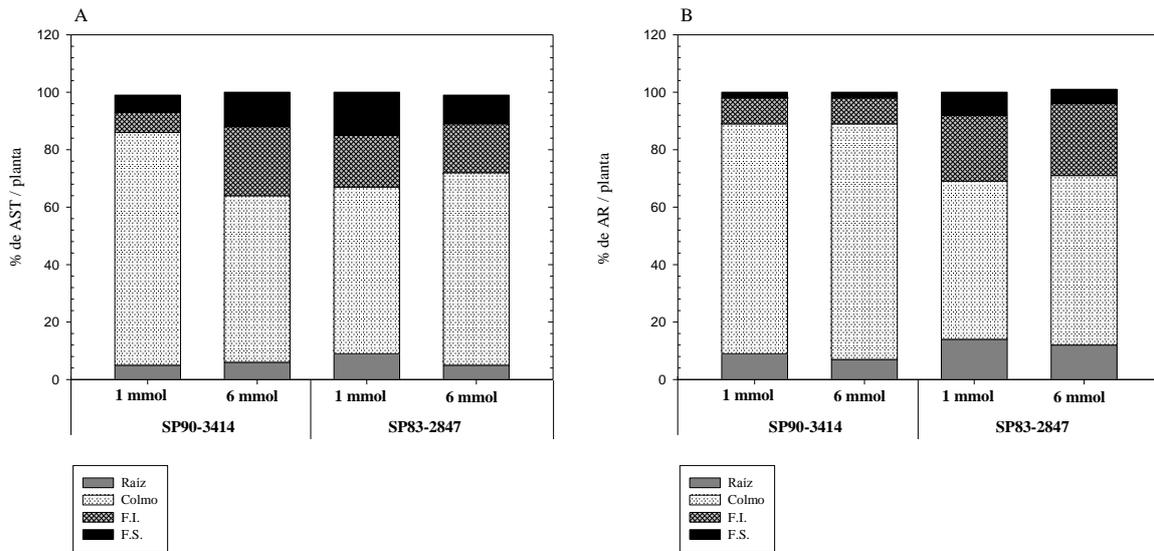


Figura 11 - Percentual de açúcares solúveis totais (A) e redutores (B) nos genótipos de cana-de-açúcar SP90-3414 e SP83-2847, em função do suprimento de K na solução nutritiva.

Os resultados mostram que o percentual de açúcares (solúveis totais e redutores) foi maior nos colmos, seguido pela % nas folhas (FS + FI) e por último nas raízes, sendo que a redistribuição de fotoassimilados das folhas para as raízes e outros órgãos, é mediada principalmente pelo floema, e influenciada diretamente pelo adequado suprimento de K (MENGEL, 1980; PATRICK et al., 2001). Segundo Epstein e Bloom (2006), o acúmulo de carboidratos, nas folhas de plantas deficientes em K, é resultado da substituição das moléculas osmóticas, na qual o K exerce grande papel. Cakmak, Hengeler e Marschner (1994) verificaram que as concentrações percentuais de AST aumentaram significativamente em folhas de plantas de feijão deficientes em K, em relação ao sistema radicular. O mesmo ocorreu para os teores de AR nas folhas coletadas aos 6, 9 e 12 dias de desenvolvimento das plantas. Com relação às raízes, esses autores verificaram que os teores de AR aumentaram aos 6 e 9 dias quando as plantas foram submetidas a deficiência de K. Essa alta concentração de açúcares redutores é uma resposta adaptativa das plantas para compensar a disfunção osmótica ocasionada pela falta de K (STEINGRÖVER, 1983). Com relação ao percentual de AST nas raízes, as plantas com adequado suprimento de K apresentam maiores valores, com exceção do cultivar tolerante ao estresse hídrico, que apresentou maior valor quando submetido a baixa concentração de K na solução nutritiva, explicando possivelmente o fato do peso seco radicular não ter variado entre as doses de K nesse cultivar.

3.3.6 Eficiência de uso e absorção de potássio

A redução da concentração de K na solução nutritiva proporcionou aumento da eficiência de uso de K (KU_tE) para as folhas nos dois cultivares de cana-de-açúcar. O cultivar SP90-3414 apresentou uma KU_tE 29% maior com a redução do suprimento de K em solução, já para o cultivar SP83-2847 esse aumento foi de 74% (figura 12A). Considerando as diferenças genótípicas verificou-se que apenas quando submetidos à dose de K de 1 mmol L⁻¹ é que o cultivar SP83-2847 apresentou 18% maior KU_tE em relação ao genótipo suscetível. A KU_tE para o colmo foi influenciada pela redução da concentração de K na solução nutritiva apenas para o cultivar SP83-2847, resultando em decréscimo de 46% (figura 12B). Considerando as diferenças genótípicas, apenas quando submetidas à dose de K de 1 mmol L⁻¹ na solução nutritiva é que o cultivar SP90-3414 apresentou diferenças significativas em relação ao SP83-2847, aumentando em 98% sua KU_tE .

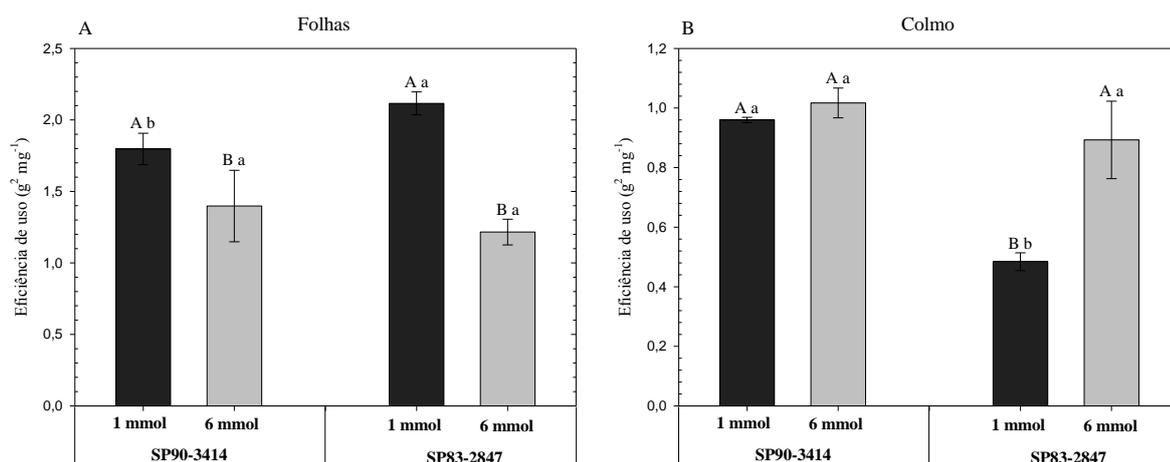


Figura 12 - Eficiência de uso de K (KU_tE) nas folhas (A) e colmo (B) nos genótipos de cana-de-açúcar SP90-3414 e SP83-2847, em função do suprimento de K na solução nutritiva. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro do mesmo cultivar) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos dos cultivares (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

A KU_tE nas raízes aumentou no cultivar SP90-3414 com a redução da disponibilidade de K na solução nutritiva, proporcionando um aumento de 60% no valor desse parâmetro (figura 13A). A eficiência de absorção de K (KU_pE) pelas raízes diminuiu conforme a redução da concentração de K na solução nutritiva para os dois cultivares estudados (figura 13B), resultando em decréscimo de 56% para o cultivar SP90-3414 e 60% para o SP83-2847. Com relação às diferenças genótípicas, foram encontradas diferenças apenas quando as plantas foram desenvolvidas em solução nutritiva contendo 6 mmol L⁻¹ de K, em que o

cultivar SP90-3414 apresentou uma eficiência de absorção 32% maior do que a encontrada para o cultivar SP83-2847 (Figura 13B).

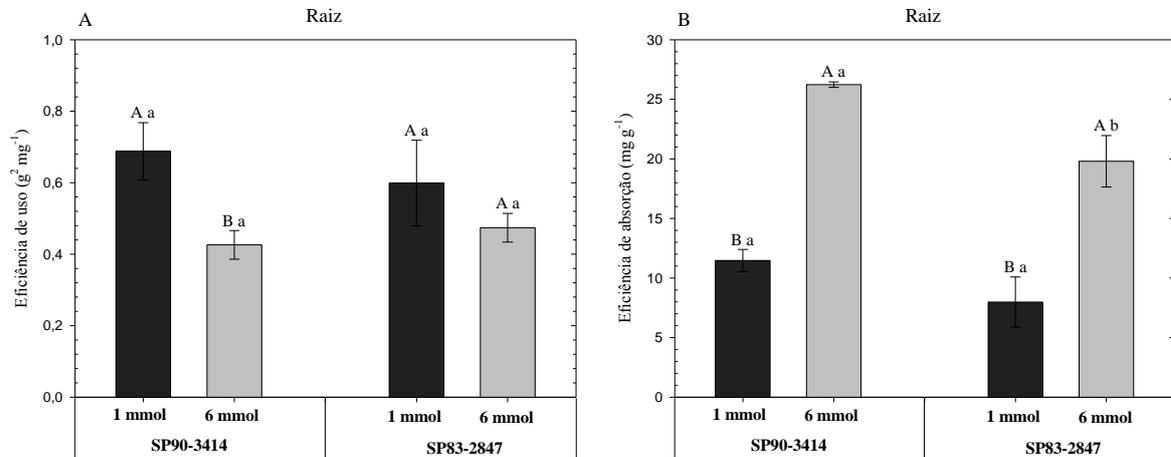


Figura 13 - Eficiência de uso de K (*KUtE*) (A) e de absorção (*KUpE*) (B) das raízes nos genótipos de cana-de-açúcar SP90-3414 e SP83-2847, em função do suprimento de K na solução nutritiva. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro do mesmo cultivar) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos dos cultivares (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

A eficiência de um nutriente pode ser avaliada a partir de dois componentes: a eficiência de absorção (*KUpE*) e a eficiência de utilização (*KUtE*). O bom desenvolvimento em locais com baixa disponibilidade de nutrientes pode ser adquirido não somente com uma maior aquisição de nutrientes, mas também com seu uso mais eficiente em níveis fisiológicos. Variações genótípicas vêm sendo observadas sobre o uso eficiente de nutrientes como o N, P e K (RENGEL; DAMON, 2008; WHITE; HAMMOND, 2008; SYLVESTER-BRADLEY; KINDRED, 2009), e consideráveis variações na *KUpE* e *KUtE* têm sido identificadas entre os genótipos existentes de uma variedade de espécies, incluindo alfafa (JAMES et al., 1995), feijão (SHEA; GERLOFF; GABELMAN, 1968), soja (SALE; CAMPBELL, 1987), tomate (CHEN; GABELMAN, 1995), milho (FARINA; CHANNON; PHIPSON, 1983), trigo (DAMON; RENGEL, 2007), cevada (PETTERSSON; JENSÉN, 1983), arroz (YANG et al., 2004).

Segundo Rengel e Damon (2008), a *KUpE* é governada por mecanismos relacionados à arquitetura radicular, alta capacidade de absorção da superfície radicular bem como a capacidade de mobilizar K – não trocável a partir de exsudatos radiculares. A *KUtE* é baseada no transporte e, principalmente, na redistribuição efetiva de K entre organelas, células e órgãos – tecidos vegetais –, na capacidade de utilizar outros íons como substitutos para o K⁺

(e.g., Na^+ , Cs^+ , Li^+ , NH_4^+) em processos de ajuste osmótico celular, na capacidade de direcionar os fotoassimilados para os órgãos reprodutivos, aumento na eficiência fotossintética e incremento no crescimento da parte aérea (WHITE, 2013). Para nutrientes que dependem principalmente do processo de difusão como forma de contato íon-raiz, tal como o K, é muito importante que haja uma grande área de contato entre raiz e solo, ou seja, possuir uma vasta superfície radicular. Portanto, como já verificado anteriormente, as diferenças ocasionadas pela redução do suprimento de K em relação ao comprimento e superfície radicular, auxiliam em uma maior *KUpE*, sendo possível observar que os cultivares demonstraram as mesmas diferenças significativas entre a eficiência de absorção e a superfície radicular.

George, Lu e Zhou (2002) estudaram o efeito de quatro doses de K, e um controle, sob a *KUtE* e *KUpE* nas raízes de cultivares de batata doce, e encontraram que conforme se aumentava a dose de K, a *KUpE* aumentava gradativamente ao passo que a *KUtE* diminuía. Resultados semelhantes ao encontrado para a cana-de-açúcar no presente experimento, em que a quantidade de MS produzida por miligrama de K (eficiência de utilização de K - *KUtE*) foi maior para raízes e folhas quando submetidas a dose de K de 1 mmol L^{-1} na solução nutritiva. Zhang et al. (2007) estudando a diferença na *KUtE* em cultivares de algodão convencional e transgênico, verificaram que, ambos os cultivares apresentaram maiores valores de *KUtE* quando submetidos a menor concentração de K na solução.

Em termos produtivos de biomassa de folhas, colmos e raízes, podemos considerar que o genótipo SP90-3414 possui maior eficiência de uso de K do que o SP83-2847, visto que em condições de baixa concentração de K na solução nutritiva foi observada maior produção de MS de colmo (órgão de interesse para a cultura da cana-de-açúcar) por miligrama de nutriente disponível, resultado da maior utilização desse K pelo cultivar SP83-2847 para formação de folhas.

3.3.7 Taxa de assimilação de CO_2 e condutância estomática

A redução da concentração de K na solução nutritiva influenciou negativamente a taxa de assimilação de CO_2 (*A*) do cultivar SP83-2847, promovendo um decréscimo de 39% nesse parâmetro (figura 14A). Os cultivares apresentaram diferenças significativas apenas quando desenvolvidos na dose de K de 6 mmol L^{-1} , quando o cultivar SP83-2847 apresentou 65% maior *A* em relação ao cultivar SP90-3414 (Figura 14A). Com relação a condutância estomática (*gs*), a redução da concentração de K na solução nutritiva promoveu decréscimo significativo de 40% e de 26% para os cultivares SP90-3414 e SP83-2847, respectivamente

(figura 14B), porém os genótipos só diferiram para este parâmetro quando desenvolvidos na dose de K de 1 mmol L⁻¹, sendo a *g_s* do cultivar SP83-2847 75% maior que aquela observada no genótipo SP90-3414 (figura 14B).

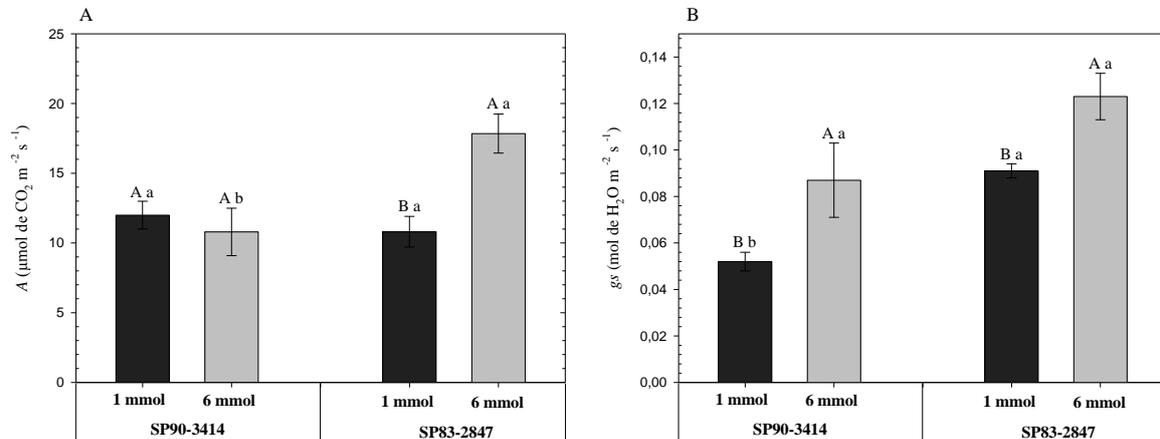


Figura 14 - Taxa de assimilação de CO₂ (A) e condutância estomática (B) nos genótipos de cana-de-açúcar SP90-3414 e SP83-2847, em função do suprimento de K na solução nutritiva. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro do mesmo cultivar) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos dos cultivares (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

Muitos estudos tem demonstrado que a deficiência de K reduz significativamente a taxa fotossintética (PETTIGREW; MEREDITH JUNIOR, 1997; BEDNARZ; OOSTERHUIS, 1999), por haver efeitos negativos na condutância estomática (PERVEZ; ASHRAF; MAKHDUM, 2004). No entanto, relatos na literatura comparando o efeito do K na fotossíntese em diferentes espécies de plantas tendem a ser inconsistentes. Tsonev et al. (2011) demonstraram efeito positivo da adubação potássica sobre a taxa fotossintética, apenas em culturas submetidas à deficiência hídrica. Da mesma forma, Sen Gupta, Berkowitz e Pier (1989) reportaram que plantas supridas com elevadas concentrações de K mostraram taxas similares de fotossíntese, no entanto quando submetidas à seca mostraram relações positivas entre a taxa fotossintética e doses de K aplicadas. O decréscimo da taxa fotossintética pela deficiência de K aparentemente está relacionada com a redução da condução estomática, aumento da resistência do mesófilo foliar e diminuição da atividade da ribulose-bifosfato (RuBP) carboxilase (CAKMAK; ENGELS, 1999; ZHAO; OOSTERHUIS; BEDNARZ, 2001). Peoples e Koch (1979) estudaram a relação entre a concentração de K nas folhas, assimilação de CO₂, atividade da RuBP carboxilase e resistência estomática na cultura da alfafa, demonstrando que a taxa de assimilação de CO₂ e a atividade da RuBP carboxilase aumentaram gradativamente com o aumento da concentração de K na folha, contudo, a

resistência estomática apresentou resultado inverso, diminuindo conforme o aumento da concentração de K. No entanto, as altas concentrações de carbono interno nas folhas demonstram que a resistência do mesófilo foliar é mais importante do que a resistência estomática na limitação da fotossíntese em folhas deficientes em K (HUBER, 1984).

Pervez, Ashraf e Makhdum (2004) encontraram correlações positivas entre o aumento da dose de K aplicada e o aumento da taxa de assimilação de CO₂ e condutância estomática, sendo essas diferenças encontradas tanto para as doses quanto para os genótipos de algodão estudados. Resultados semelhantes foram encontrados para outras culturas, tais como a cultura da oliveira (ARQUERO; BARRANCO; BENLLOCH, 2006). Em adição a redução da taxa de assimilação de CO₂ e condutância estomática em condições de deficiência de K, a redistribuição de fotoassimilados também é restringida nessas condições (ASHLEY; GOODSON, 1972; MENGEL; VIRO, 1974; MENGEL; HAEDER, 1977), promovendo o acúmulo de açúcares nas folhas, sendo a quantidade de açúcares redutores maior do que a de sacarose (HUBER, 1985).

3.3.8 Transpiração e consumo de água

A redução da concentração de K na solução nutritiva diminuiu significativamente a taxa de transpiração (*E*) dos cultivares SP90-3414 e SP83-2847, promovendo decréscimo, respectivamente, de 58% e 29% (figura 15A), porém as diferenças genotípicas somente apareceram quando as plantas foram desenvolvidas em solução contendo 1 mmol L⁻¹ de K. Nesta condição, a *E* do cultivar SP83-2847 foi 119% maior que a apresentada pelo genótipo SP90-3414 (figura 15A). O consumo de água por planta apenas diferiu significativamente, quando o suprimento de K foi reduzido na solução nutritiva, no cultivar SP90-3414, resultando em decréscimo de 17% (figura 15B). Considerando-se as diferenças genotípicas, verificou-se que o genótipo SP83-2847 apresentou menor consumo de água comparado ao cultivar SP90-3414, sendo essa redução de 20% para a dose de K de 1 mmol L⁻¹ e 26% para a dose de 6 mmol L⁻¹ (figura 15B).

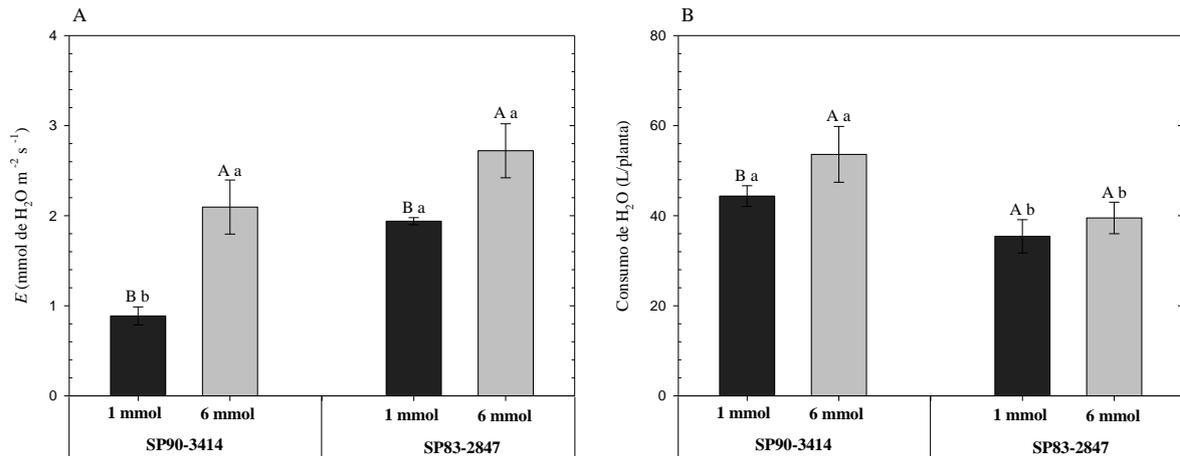


Figura 15 - Transpiração (A) e consumo de água (B) nos genótipos de cana-de-açúcar SP90-3414 e SP83-2847, em função do suprimento de K na solução nutritiva. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro do mesmo cultivar) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos dos cultivares (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

Como visto anteriormente, a deficiência de K está associada com o processo de abertura e fechamento estomático, sendo assim alguns autores afirmam que a deficiência de K, por favorecer o fechamento dos estômatos, inibe a taxa de transpiração das plantas (DHAKAL; ERDEI, 1986; SMITH; STEWART, 1990; BEDNARZ; OOSTERHUIS; EVANS, 1998; TOMEMORI; HAMAMURA; TANABE, 2002). Dessa forma as plantas com suprimento adequado de K tendem a manter seus estômatos abertos por mais tempo, aumentando a taxa de transpiração das plantas, fato que pode ser observado por meio dos resultados de condutância estomática. O aumento da taxa transpiratória das plantas promove o aumento da condutância estomática, que ao invés de estabilizar a transpiração promove seu rápido aumento, sendo o oposto também verificado. Ou seja, o aumento da condutância estomática promove o aumento da taxa transpiratória (JARVIS et al., 1999). Existem muitos modelos explicando o influxo de água no movimento estomático, o mais simples deles reporta apenas duas funções específicas, a ambiental e a fisiológica. A função ambiental atua como um sensor de mudanças externas (luz, temperatura, umidade e outras) que interferem na taxa transpiratória das plantas, promovendo assim um estímulo que ativará a função fisiológica, promovendo mudanças na condutância estomática das plantas em resposta a mudança na taxa transpiratória, ou seja, a função fisiológica atua como um tradutor desse “sinal” ambiental (FARQUHAR; COWAN, 1974).

Gonçalves et al. (2010) verificaram que a redução da taxa transpiratória de quatro cultivares de cana-de-açúcar foi diretamente proporcional à redução da condutância

estomática, não havendo, contudo, diferenças entre os cultivares. Porém, no presente estudo foram encontradas diferenças genotípicas quando as plantas foram desenvolvidas em solução contendo 1 mmol L^{-1} de K, tanto para a taxa de transpiração quanto para a taxa de condutância estomática, o que pode estar relacionado com o maior acúmulo de K nas folhas (FS + FI) do cultivar SP83-2847. Logo, essa maior quantidade de K pode estar influenciando no processo de abertura e fechamento estomático e conseqüentemente, nas diferentes taxas de transpiração e condutância estomática dos cultivares (Figuras 15A e 15B).

O consumo total de água pelas plantas durante o desenvolvimento do experimento está relacionado com a transpiração total dos cultivares, o que está diretamente ligado à área de superfície de trocas gasosas com o ambiente. A redução da área foliar é uma estratégia atribuída para diminuir a superfície transpirante e o gasto metabólico para manutenção dos tecidos (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; SMIT; SINGELS, 2006; INMAN-BAMBER et al., 2008). Oliveira et al. (2009) encontraram relação linear entre o aumento da área foliar e o aumento da transpiração em quatro variedades de mangueira. Correlação semelhante foi encontrada para a cultura do feijoeiro, quando a máxima transpiração das plantas foi encontrada no mesmo período de máxima área foliar fotossinteticamente ativa (DE OLIVEIRA; E SILVA, 1990). Assim, visto a influência que a deficiência de K promove no desenvolvimento da área foliar das culturas, podemos dizer que o consumo total de água pelos genótipos SP90-3414 e SP83-2847 foi resultado direto das áreas foliares desenvolvidas pelos cultivares de cana-de-açúcar (Figura 8). O fato de não ocorrer diferenças significativas das doses de K no consumo de água do cultivar tolerante SP83-2847 se deve, provavelmente, a sua menor exigência nutricional (ou maior eficiência nutricional), visto a ausência de resposta à redução da concentração de K na solução para a produção de biomassa de folhas e colmos (Figuras 7A e 7B) e de raízes (Figura 9).

3.3.9 Eficiência de uso de água

Considerando o cálculo de eficiência de uso de água (EUA) descrito por Wang e Gao (2001), verificou-se que os cultivares se comportaram de forma diferente com a concentração de K na solução nutritiva. O cultivar SP90-3414 aumentou em 120% sua EUA com a redução da concentração de K na solução nutritiva, enquanto que o cultivar SP83-2847 apresentou decréscimo de 26% com a redução do suprimento de K (figura 16A). Em relação as diferenças genotípicas, quando desenvolvidos na dose de K de 1 mmol L^{-1} , verificou-se que o cultivar SP90-3414 apresentou aumento de 134% na EUA em relação ao SP83-2847, porém quando desenvolvidos em solução nutritiva contendo 6 mmol L^{-1} , a EUA das plantas do

cultivar SP83-2847 apresentaram em média 28% maior EUA do que aquelas apresentadas pelo cultivar SP90-3414 (figura 16A). Os resultados segundo metodologia descrita por Grzebisz et al. (2013) mostram uma relação negativa entre a redução do suprimento de K na solução nutritiva e o decréscimo da EUA para o cultivar SP90-3414 (figura 16B), resultando em redução de 23%. Com relação às diferenças genotípicas e considerando-se a dose de K de 6 mmol L⁻¹, o cultivar SP90-3414 aumentou em 15% a EUA em relação ao cultivar SP83-2847.

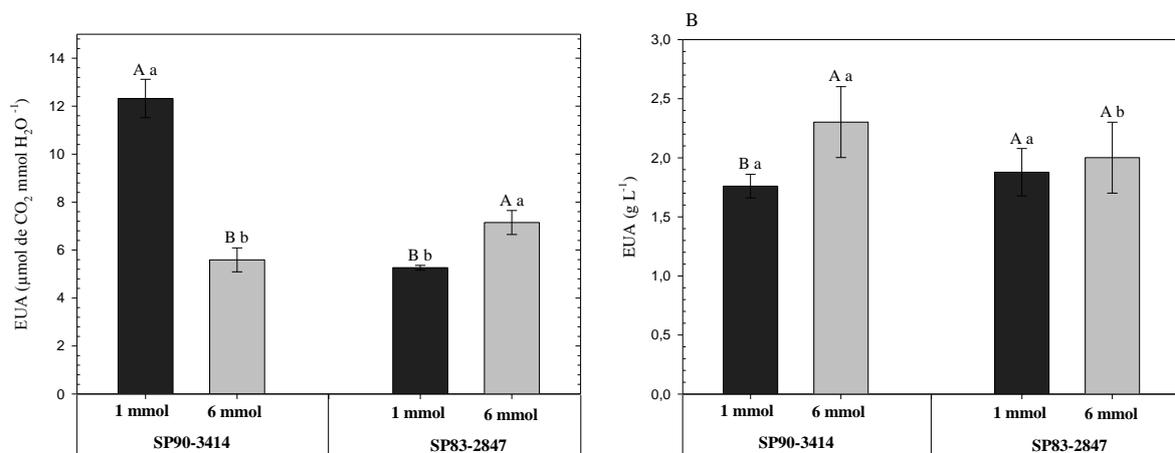


Figura 16 - Eficiência de uso de água segundo Wang; Gao (2001) [A] e Grzebisz et al. (2013) [B] nos genótipos de cana-de-açúcar SP90-3414 e SP83-2847, em função do suprimento de K na solução nutritiva. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro do mesmo cultivar) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos dos cultivares (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

Apesar do cultivar SP90-3414 submetido a dose de K de 1 mmol L⁻¹ de solução ter apresentado a maior taxa de EUA, segundo Wang e Gao (2001), o resultado se contradiz em relação aquela calculada por Grzebisz et al. (2013), pois sua produção de massa seca por litro de água consumida durante o experimento foi menor comparada aos outros tratamentos, logo, mesmo que com a maior assimilação de CO₂ por mmol de água a produção de fotoassimilados não foi o suficiente para maior produção de MS de planta do que aquelas submetidas a dose de K de 6 mmol L⁻¹ de solução nutritiva. Com esses resultados verificou-se que a EUA pode ser interpretada de várias maneiras segundo a metodologia descrita para seu cálculo. A relação entre o K e a EUA das plantas se deve principalmente pelas funções desempenhadas por esse elemento na fisiologia vegetal. Sabe-se que o K é responsável pela manutenção do turgor celular no nível de citoplasma, garantindo a ótima atividade enzimática e neutralização do pH, e a nível de vacúolo garantindo a expansão das células por meio da criação de um

potencial osmótico (MARSCHNER, 2012). Porém, a grande maioria dos estudos relaciona o manejo eficiente do K como amenizador de estresses ocasionados pelo déficit hídrico, e não como forma de aumentar a produção em locais com bom suprimento de água, apesar de alguns estudos mostrarem que, mesmo em condições hídricas adequadas, o K pode aumentar a eficiência do uso da água, segundo metodologia de Grzebiz et al. (2013), para algumas culturas, tais como oliveiras (ARQUERO; BARRANCO; BENLLOCH, 2006), cevada (ANDERSEN; JENSEN; LÖSCH, 1992), girassol (FOURNIER et al., 2005), milho e beterraba (GRZEBIZ et al., 2013).

3.3.10 Potencial da água na folha

Os genótipos demonstraram diferenças significativas quanto ao potencial da água foliar (Ψ_a) (figura 17). O Ψ_a do cultivar SP83-2847 foi maior (menos negativo) em relação ao genótipo SP90-3414, sendo que quando submetidos à dose de K de 1 mmol L^{-1} , esse aumento foi de 57%, enquanto que quando submetidos a dose de K de 6 mmol L^{-1} o aumento correspondeu a 32%.

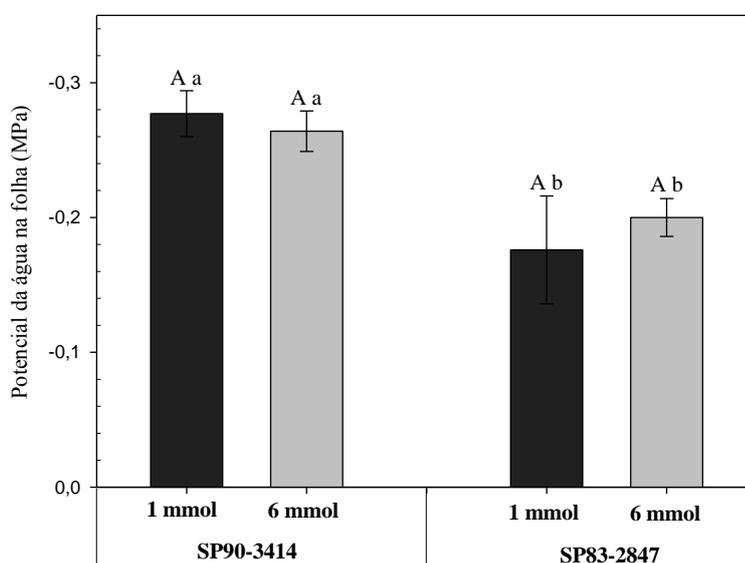


Figura 17 - Potencial da água na folha nos genótipos de cana-de-açúcar SP90-3414 e SP83-2847, em função do suprimento de K na solução nutritiva. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro do mesmo cultivar) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos dos cultivares (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

O potencial da água na folha indica o seu estado energético, cujos gradientes explicam os fluxos da água no sistema solo-planta-atmosfera (BERGONCI et al., 2000) de modo que, variações no seu valor podem afetar a assimilação do carbono da planta (HSIAO, 1973). A

variação do potencial da água na folha promove variações na expansão foliar (BOYER, 1970), no conteúdo e organização da clorofila no mesófilo das plantas (ALBERTE; THORNER; FISCUS, 1977), e no fechamento estomático que pode ocorrer dentro de uma larga faixa de potencial da água na folha dependendo da espécie (JONES, 1992), fatores esses que promovem alterações na assimilação de CO₂ pelas plantas.

Embora haja variação ao longo do dia, mesmo em plantas desenvolvidas sem restrições hídricas, o potencial da água na folha é um parâmetro que descreve o estado hídrico da planta como um todo, e tem sido muito utilizado em estudos das relações hídricas dos vegetais (HISAO, 1973; SIONIT; KRAMER, 1976; WESTGATE, 1994). Como o K exerce significativas influências na condição hídrica dos vegetais (potencial osmótico) é de se esperar que, em condições de restrição hídrica esse elemento possa auxiliar na amenização dos efeitos ocasionados pelo estresse nas plantas.

3.3.11 Atividade da redutase do nitrato

Não houve diferenças significativas na atividade da redutase do nitrato, tanto para as doses de K, quanto para os cultivares estudados (figura 18). Em valores absolutos, a atividade da RNO₃⁻ no genótipo SP83-2847, cultivado com a menor dose de K, foi 45% superior àquela determinada no genótipo SP90-3414, também com o menor suprimento de K.

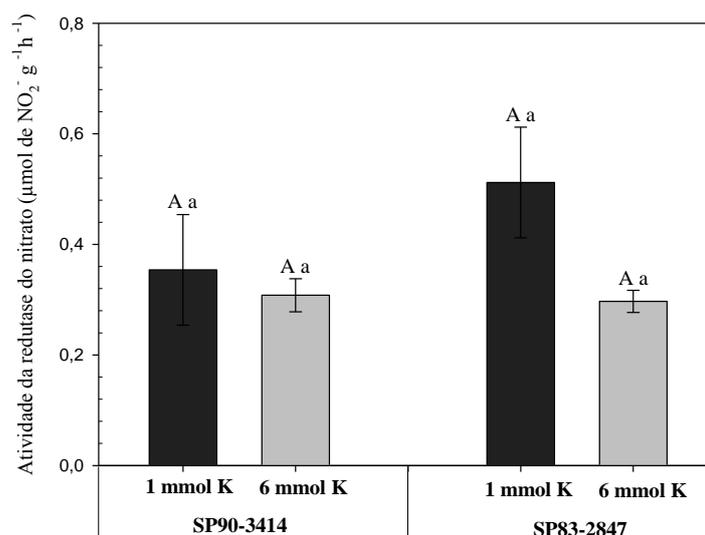


Figura 18 - Atividade da enzima redutase do nitrato nos genótipos de cana-de-açúcar SP90-3414 e SP83-2847, em função do suprimento de K na solução nutritiva. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro do mesmo cultivar) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos dos cultivares (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

O K participa da ativação e da síntese da enzima redutase do nitrato (MARSCHNER, 2012). A função do K no balanço cátion-ânion é também refletida no metabolismo do nitrato, no qual o K é o íon acompanhante para o transporte a longa distância no xilema bem como para o estoque nos vacúolos. Na parte aérea, após a redução do nitrato, o K liga-se a ácidos orgânicos (principalmente malato) que é transportado para as raízes onde servirá novamente como íon acompanhante para onitrato (MENGEL; KIRKBY, 2001). Diversos estudos abordam a relação entre K^+ e nitrogênio (N) na atividade da enzima redutase do nitrato, porém os resultados nem sempre são concordantes. Viana e Kiehl (2010) estudaram o efeito da combinação da adubação potássica e nitrogenada sobre a atividade da enzima redutase do nitrato em plantas de trigo, demonstrando que as doses de K não influenciaram na atividade dessa enzima. Porém, outros estudos demonstram que a influência da adubação na atividade da redutase do nitrato ocorre apenas quando acompanhada da adubação nitrogenada (VENKAJESAN; GANAPATHY, 2004; DA SILVA et al., 2011). A tendência da atividade da redutase do nitrato ser maior nos tratamento com menor concentração de K pode ser explicada pela maior eficiência de uso do K nesses mesmos tratamentos (maior redistribuição do K das folhas maduras e senescentes para os tecidos mais jovens), porém não é possível afirmar que houve correlação entre o incremento da dose de K na solução nutritiva e a atividade da redutase do nitrato, sob a mesma concentração de N, nos genótipos de cana-de-açúcar estudados.

3.4 Conclusões

A deficiência de K reduz a eficiência de absorção desse elemento pelos cultivares SP90-3414 e SP83-2847, porém os efeitos promovidos por essa redução influenciam apenas na produção do cultivar SP90-3414. O cultivar SP83-2847 demonstra maior adaptação à condição de baixa disponibilidade de K visto que, nessa condição, esse genótipo apresenta menor porcentagem de redução para os parâmetros morfológicos e fisiológicos analisados. Contudo, em condição de adequado suprimento potássico o genótipo SP90-3414 demonstra ser mais produtivo em relação ao SP83-2847.

Referências

- ALBERTE, R.S.; THORNER, J.P.; FISCUS, E.L. Water stress effects on the content and organization of chlorophyll in mesophyll and bundle sheath chloroplasts of maize. **Plant Physiology**, Rockville, v. 59, n. 35, p. 351-353, 1977.
- ALI, M.; BAKHT, J.; KHAN, G.D. Effect of water deficiency and potassium application on plant growth, osmolytes and grain yield of *Brassica napus* cultivars. **Acta Botanica Croatica**, Zagreb, v. 73, n. 2, p.299-314, 2014.
- ANDERSEN, M.N.; JENSEN, C.R.; LÖSCH, R. The interaction effects of potassium and drought in field-grown barley. **Acta Agriculturae Scandinavica**, Oslo, v. 42, p. 34-44, 1992.
- ARQUERO, O.; BARRANCO, D.; BENLLOCH, M. Potassium starvation increases stomatal conductance in olive trees. **HortScience**, Alexandria, v. 41, p. 433-436, 2006.
- ASHLEY, D.A.; GOODSON, R.D. Effect of time and potassium status on ¹⁴C-labeled photosynthate movement in cotton. **Crop Science**, Madison, v. 12, p. 686-690, 1972.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS - ANDA. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes 2009-2010**. São Paulo, 2010. 18 p.
- BARBERON, M.; GELDNER, N. Radial transport of nutrients: the plant root as a polarized epithelium. **Plant Physiology**, Rockville, v. 166, n. 2, p. 528-537, 2014.
- BEDNARZ, C.W.; OOSTERHUIS, D.M. Physiological changes associated with potassium deficiency in cotton. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 22, p. 303-313, 1999.
- BEDNARZ, C.W.; OOSTERHUIS, D.M.; EVANS, R.D. Leaf photosynthesis and carbon isotope discrimination of cotton in response to potassium deficiency. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 39, p. 131-139, 1998.
- BELTRAME, J.A. Novas variedades comerciais para a Região Centro Sul. In: SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2., 2005, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ/USP, 2005. p. 13.
- BEN-ZIONI, A.; VAADIA, Y.; LIPS, S.H. Nitrate uptake by roots as regulated by nitrate reduction products of the shoot. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 24, p. 288-290, 1971.
- BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; SANTOS, A.O. Potencial de água na folha como um indicador de déficit hídrico em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.35, p. 1531-1540, 2000.
- BERINGER, H.; NOTHDURFT, F. Effects of potassium on plant and cellular structures. In: MUNSON, R.D. (Ed.). **Potassium in agriculture**. Madison, WI: ASA; CSSA; SSSA, 1985. p. 351-368.

BLOM-ZANDSTRA, M.; VOGELZANG, S.A.; VEEN, B.W. Sodium fluxes in sweet pepper exposed to varying sodium concentrations. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 49, p. 1863-1868, 1998.

BOYER, J.S. Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybean and sunflower at various leaf water potentials. **Plant Physiology**, Rockville, v. 46, n. 2, p. 233-235, 1970.

CAKMAK, I. ENGELS, C. Role of mineral nutrients in photosynthesis and yield formation. In: RENGEL, Z. (Ed.). **Mineral nutrition of crops**. New York: Haworth Press, 1999. p. 141-168.

CAKMAK, I; HENGELER, C.; MARSCHNER, H. Partitioning of shoot and root dry matter and carbohydrates in bean plants suffering from phosphorus, potassium and magnesium deficiency. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 45, p. 1245-1250, 1994.

CHEN, J.; GABELMAN, W.H. Morphological and physiological characteristics of tomato roots associated with potassium-acquisition efficiency. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 83, p. 213-225, 2000.

CHOW, W.S.; BALL, M.C.; ABDERSON, J.M. Growth and photosynthetic responses of spinach to salinity: implications of K⁺ nutrition for salt tolerance. **Australian Journal of Plant Physiology**, Collingwood, v. 17, p. 563-578, 1990.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, DF, 2014. 29 p.

DA SILVA, S.M.; OLIVEIRA, L.J.; FARIA, F.P.; DOS REIS, E.F.; CARNEIRO, M.A.C.; DA SILVA, S.M. Atividade da enzima nitrato redutase em milho cultivado sob diferentes níveis de adubação nitrogenada e potássica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 11, p. 1931-1937, 2011.

DAMON, P.M.; RENGEL, Z. Wheat genotypes differ in potassium efficiency under glasshouse and field conditions. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v. 58, p. 816-825, 2007.

DE ALMEIDA, J.C.R. **Nutrição, crescimento, eficiência de uso de água e de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus grandis* fertilizados com potássio e sódio**. 2009. 112 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

DE OLIVEIRA, E.T. **Micropropagação e acompanhamento bioquímico, fisiológico e nutricional da babosa (*Aloe vera* (L.) Burm. f.) cultivada *ex vitro* em doses de nitrogênio**. 2007. 94 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

DE OLIVEIRA, F.A.; E SILVA, J.J.S. Evapotranspiração, índice de área foliar e desenvolvimento radicular do feijão irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 25, p. 317-322, 1990.

- DELGADO, I.C.; SÁNCHEZ-RAYA, A.J. Physiological response of sunflower seedlings to salinity and potassium supply. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 30, p. 773-783, 1999.
- DHAKAL, M.R.; ERDEI, L. Long-term effects of abscisic acid in K⁺ transport in Young wheat plants of different K⁺ status. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 68, p. 637-640, 1986.
- DINARDO-MIRANDA, L.L.; DE VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2010. 882 p.
- DOLAN, L.; DAVIES, J. Cell expansion in roots. **Current Opinion in Plant Biology**, London, v. 7, p. 33-29, 2004.
- DREW, M.C.; LÄUCHLI, A. The role of the mesocotyl in sodium exclusion from the shoot of *Zea mays* L. (cv. Pioneer 3906). **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 38, p. 409-418, 1987.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. 2. ed. Londrina: Editora Planta, 2006. 399 p.
- ERICE, G.; LOUAHLIA, S.; IRIGOYEN, J.J.; SÁNCHEZ-DÍAZ, M.; ALAMI, I.T.; AVICE, J.C. Water use efficiency, transpiration and net CO₂ exchange of four alfalfa genotypes submitted to progressive drought and subsequent recovery. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 72, n. 2, p. 123-130, 2011.
- FAGERIA, N.K. Eficiência do uso de potássio pelos genótipos de arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 10, p. 2115-2120, 2000.
- FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C.; JONES, C.A. Rice. In: FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C.; JONES, C.A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1997. p. 283-343.
- FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C.; LI, Y.C. The role of nutrient efficient plants in improving crops yields in the twenty first century. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 31, p. 1121-1157, 2008.
- FAGERIA, N.K.; MOREIRA, A. The role of mineral nutrition on root growth of crop plants. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 110, p. 251-331, 2011.
- FARIDUDDIN, Q.; VARSHNEY, P.; YUSUF, M.; AHMAD, A. Polyamines: potent modulators of plant response to stress. **Journal of Plant Interactions**, Oxon, v. 8, n.1, p. 1-16, 2013.
- FARINA, M.P.W.; CHANNON, P.; PHIPSON, J.D. Genotypic differences in the potassium requirement of two maize cultivars. **Crop Production**, Ithaca, v. 12, p. 84-86, 1983.
- FARQUHAR, G.D.; COWAN, I.R. Oscillations in stomatal conductance – influence of environmental gain. **Plant Physiology**, Rockville, v. 54, p. 769-772, 1974.

FOURNIER, J.M.; ROLDÁN, A.M.; SÁNCHEZ, C.; ALEXANDRE, G.; BENLLOCH, M. K^+ starvation increases water uptake in whole sunflower plants. **Plant Science**, Amsterdam, v. 168, p. 823-829, 2005.

FOX, T.C.; GUERINOT, M.L. Molecular biology of cation transport in plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 49, p. 669-696, 1998.

GONÇALVES, E.R.; FERREIRA, V.M.; SILVA, J.V.; ENDRES, L.; BARBOSA, T.P.; DUARTE, W.G. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a* em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, João Pessoa, v. 14, p. 378-386, 2010.

GEORGE, M.S.; LU, G.; ZHOU, W. Genotypic variation for potassium uptake and utilization efficiency in sweet potato (*Ipomoea batatas* L.). **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 77, p. 7-15, 2002.

GERARDEAUX, E.; JORDAN-MEILLE, L.; CONSTANTIN, J.; PELLERIN, S.; DINGKUHN, M. Changes in plant morphology and dry matter partitioning caused by potassium deficiency in *Gossypium hirsutum* (L.). **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 67, p. 451-459, 2010.

GLASS, A.D.M. Regulation of ion transport. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 34, p. 311-326, 1983.

GOLDEN, L.E. Plant nutrients uptake by sugarcane in Louisiana. **Sugar Journal**, New Orleans, v. 22, p. 21-22, 1960.

GOMES, J.F.F. **Produção de colmos e exportação de macronutrientes primários por cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.)**. 2003. 65 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

GRZEBISZ, W.; GRANSEE, A.; SZCZEPANIAK, W.; DIATTA, J. The effects of potassium fertilization on water-use efficiency in crop plants. **Journal of Plant Nutrition**, Weinheim, v. 176, p. 355-374, 2013.

HACKETT, C.A. A study of the root system of barley. **New Phytologist**, London, v. 67, p. 287-299, 1968.

HANWAY, J.J.; JOHNSON, J.W. Potassium nutrition of soybeans. In: MUNSON, R.D. (Ed.). **Potassium in agriculture**. Madison, WI: ASA; CSSA; SSSA, 1985. p. 753-764.

HAYASHI, H.; CHINO, M. Chemical composition of phloem sap from the uppermost internode of the rice plant. **Plant and Cell Physiology**, Kyoto, v. 31, p. 247-251, 1990.

HEWITT, E.J. Essential and functional methods in plants. In: ROBB, D.A.; PIERPOINT, W.S. **Metal and micronutrients: uptake and utilization by plants**. 1. ed. New York: Academic Press, 1983. v. 4, p. 313-315.

HILLE, B. A K^+ channel worthy of attention. **Science**, Washington, DC, v. 273, p. 1677, 1996.

HSIAO, T.C. Plant responses to water stress. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 24, p. 519-570, 1973.

HUBER, S.C. Biochemical basis for effects of K-deficiency on assimilate export rate and accumulation of soluble sugars in soybean leaves. **Plant Physiology**, Rockville, v. 76, p. 424-430, 1984.

HUBER, S.C. Role of potassium in photosynthesis and respiration. In: MUNSON, R.D. (Ed.). **Potassium in agriculture**. Madison, WI: ASA; CSSA; SSSA, 1985. p. 369-396.

INMAN-BAMBER, N.G.; BONNETT, G.D.; SPILLMAN, M.F.; HEWITT, M.L.; JACKSON, J. Increasing sucrose accumulation in sugarcane by manipulating leaf extension and photosynthesis with irrigation. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v. 59, p. 13-26, 2008.

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

ITOH, R.; YAMAGISHI, J.; ISHII, R. Effects of potassium deficiency on leaf growth, related water relations and accumulation of solutes in leaves of soybean plants. **Japanese Journal of Crop Science**, Tokyo, v. 66, p. 691-697, 1997.

JAMES, D.W.; DHUMAL, S.S.; RUMBAUGH, M.D.; TINDALL, T.A. Inheritance of potassium-sodium nutritional traits in alfalfa. **Agronomy Journal**, Madison, v. 87, p. 681-686, 1995.

JARVIS, A.J.; YOUNG, P.C.; TAYLOR, C.J.; DAVIES, W.J. An analysis of the dynamic response of stomatal conductance to a reduction in humidity over leaves of *Cedrella odorata*. **Plant, Cell & Environment**, Oxon, v. 22, p. 913-924, 1999.

JONES, H.G. **Plant and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology**. 2. ed. Cambridge: University Press, 1992. 428 p.

JORDAN-MEILLE, L.; PELLERIN, S. Leaf area establishment of maize (*Zea Mays* L.) field crop under potassium deficiency. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 265, p. 75-92, 2004.

JESCHKE, W.D.; PATE, J.S. Cation and Chloride partitioning through xylem and phloem within the whole plant of *Ricinus comunis* L. under conditions of salt stress. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 42, p. 1105-1116, 1991.

JUNGK, A. Root hairs and the acquisition of plant nutrients from soil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Berlin, v. 164, p. 121-129, 2001.

KIM, T.E.; HAWNKINS, B.J.; MITCHELL, A.K. Douglas-fir seedling response to a range of ammonium:nitrate ratios in aeroponic culture. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 33, p. 1638-1657, 2010.

LÄUCHLI, A.; PFLÜGER, R. Potassium transport through plant cell membranes and metabolic role of potassium in plants. In: INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE. **Potassium research review and trends**. Bern: IPI, 1978. p. 111-164.

LAVRES JUNIOR, J.; MONTEIRO, F.A. Perfilamento, área foliar e sistema radicular do capim-Mombaça submetido a combinações de doses de nitrogênio e potássio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 1069-1075, 2003.

LEONARD, R.T. Absorption of potassium into root cells. In: MUNSON, R.D. (Ed.). **Potassium in agriculture**. Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1985. p. 327-335.

LÖPPERT, H. Energy coupling for membrane hyperpolarization in *Lemna*: Respiration rate, ATP level and membrane potential at low oxygen concentrations. **Planta**, Berlin, v. 159, p. 329-335, 1983.

MAATHUIS, F.J.M.; SANDERS, D. Regulation of K⁺ absorption in plant root cells by external K⁺: interplay of different plasma membrane K⁺ transporters. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 48, p. 451-458, 1997.

MALAVOLTA, E. Potássio – Absorção, transporte e redistribuição na planta. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2005. p. 179-238.

MARSCHNER, P. (Ed.). **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2012. 615 p.

MARTIN, P. Long-distance transport and distribution of potassium in crop plants. In: COLLOQUIUM LOUVAIN-LA-NEUVE, 21., 1989, Bern. **Methods of K-research in plants**; proceedings... Bern: IPI, 1989. p. 83-100.

MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, D.; WALKER, D.J.; ROMERO, P.; MARTÍNEZ-BALLESTA, M.C.; CORREAL, E. The response of the leguminous fodder plant *Bituminaria bituminosa* to water stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Hoboken, v. 198, n. 6, p. 442-451, 2012.

MENGEL, K. Effect of potassium on the assimilate conduction to storage tissues. **Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft**, Jena, v. 93, p. 353-362, 1980.

MENGEL, K. Potassium movement within plant and its importance in assimilate transport. In: MUNSON, R.D. (Ed.). **Potassium in agriculture**. Madison, WI: ASA; CSSA; SSSA, 1985. p. 397-411.

MENGEL, K.; VIRO, M. Effects of potassium supply on the transport of photosynthates to the fruits of tomatoes (*Lycopersicon esculentum*). **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 30, p. 295-300, 1974.

MENGEL, K.; HAEDER, H.E. Effect of potassium supply on the rate phloem sap exudation and the composition of phloem sap of *Ricinus communis*. **Plant Physiology**, Rockville, v. 59, p. 282-284, 1977.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. **Principles of plant nutrition**. 5. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 849 p.

MERRILL, S.D.; TANAKA, D.L.; HANSON, J.D. Root length growth of eight crop species in Haplustoll soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, p. 913-923, 2002.

MEURER, E.J. Potássio. In: FERNANDES, M.S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p. 281-298.

OLIVEIRA, G.X.S.; FILHO, M.A.C.; PEREIRA, F.A.C.; COELHO, E.F.; PAZ, V.P.S.; NETO, M.T.C. Relações entre transpiração máxima, evapotranspiração de referência e área foliar em quatro variedades de mangueira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 31, p. 20-27, 2009.

OTTO, R.; VITTI, G.C.; LUZ, P.H.C. Manejo da adubação potássica na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1137-1146, 2010.

PATRICK, J.W.; ZHANG, W.H.; TYERMAN, S.D.; OFFLER, C.E.; WALKER, N.A. Role of membrane transport in phloem translocation of assimilates and water. **Australian Journal of Plant Physiology**, Collingwood, v. 28, p. 695-707, 2001.

PEEL, A.J.; ROGERS, S. Stimulation of sugar loading into sieve elements of willow by potassium and sodium salts. **Planta**, Berlin, v. 154, p. 94-96, 1982.

PEOPLES, T.R.; KOCH, D.W. Role of potassium in carbon-dioxide assimilation in *Medicago sativa* L. **Plant Physiology**, Rockville, v. 63, p. 878-881, 1979.

PERVEZ, H.; ASHRAF, M.; MAKHDUM, M.I. Influence of potassium nutrition on gas exchange characteristics and water relations in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Photosynthetica**, Dordrecht, v. 42, p. 251-255, 2004.

PETTERSON, S.; JENSÉN, P. Variation among species and varieties in uptake and utilization of potassium. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 72, p. 231-237, 1983.

PETTIGREW, W.T.; MEREDITH JUNIOR, W.R. Dry matter production, nutrient uptake, and growth of cotton as affected by potassium fertilization. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 20, p. 531-548, 1997.

PEUKE, A.D. Correlations in concentrations, xylem and phloem flows, and partitioning of elements and ions in intact plants. A summary and statistical re-evaluation of modelling experiments in *Ricinus communis*. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 61, p. 635-655, 2010.

POTTOSIN, I.I.; ANDJUS, P.R. Depolarization activated K⁺ channel. **Plant Physiology**, Rockville, v. 106, p. 313-319, 1994.

RAINS, D.W. Cation absorption by slices of stem tissues of bean and cotton. **Experientia**, Basel, v. 25, p. 215-216, 1969.

RAMA RAO, N. Potassium requirements for growth and its related processes determined by plant analysis in wheat. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 96, p. 125-131, 1986.

RENGEL, Z.; DAMON, P.M. Crops and genotypes differ in efficiency of potassium uptake and use. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 133, p. 624-636, 2008.

ROSOLEM, C.A. Interação do potássio com outros íons. In: SIMPÓSIO SOBRE POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2005, Piracicaba, SP. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 2005. p. 239-260.

ROSSETO, R.; SPIRONELLO, A.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. Calagem para a cana-de-açúcar e sua interação com a adubação potássica. **Bragantia**, Campinas, v. 63, p. 105-119, 2004.

RUBIO, F.; GASSMAN, W.; SCHROEDER, J.I. Sodium-driven potassium uptake by the plant potassium transporter HKT1 and mutations conferring salt tolerance. **Science**, Washington, DC, v. 270, p. 1660-1663, 1995.

SALE, P.W.G.; CAMPBELL, L.C. Differential responses to K deficiency among soybean cultivars. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 104, p. 183-190, 1987.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT**. User's guide, version 6.11. 4.ed. Cary, NC, 1996. v. 2, 842p.

SCHACHTMAN, D.P.; SCHROEDER, J.I. Structure and transport mechanism of a high-affinity potassium uptake transporter from higher plants. **Nature**, London, v. 370, p. 655-658, 1994.

SEN GUPTA, A.; BERKOWITZ, G.A.; PIER, P.A. Maintenance of photosynthesis at low leaf water potential in wheat – Role of potassium status and irrigation history. **Plant Physiology**, Rockville, v. 89, p. 1358-1365, 1989.

SHARMA, P.S.; KUMARI, T.S. Effect of potassium under water stress on growth and yield of sorghum in Vertisols. **Journal of Potassium Research India**, Jharkhand, v. 12, p. 319-325, 1996.

SHEA, P.E.; GERLOFF, G.C.; GABELMAN, W.H. Differing efficiencies of potassium utilization in strains of snap beans, *Phaseolus vulgaris* L. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 28, p. 337-346, 1968.

SIDDIQI, M.Y.; GLASS, A.D.M. Simultaneous consideration of tissue and substrate potassium concentration in K⁺ uptake kinetics: A model. **Plant Physiology**, Rockville, v. 69, p. 283-285, 1982.

SIONIT, N.; KRAMER, P.J. Water potential and stomatal resistance of sunflower and soybean subjected to water stress during various growth stages. **Plant Physiology**, Rockville, v. 58, n. 4, p. 537-540, 1976.

SMITH, M.A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 98, p. 91-97, 2006.

SMITH, S.; STEWART, G.R. Effect of potassium levels on the stomatal behaviour of the hemi-parasite *Striga hermonthica*. **Plant Physiology**, Rockville, v. 94, p. 1472-1476, 1990.

STEINGRÖVER, E. Storage of osmotically active compounds in the taproot of *Daucus carota* (L.). **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 34, p. 425-433, 1983.

SWIADER, J.M.; CHYAN, Y.; FREIJI, F.G. Genotypic differences in nitrate uptake and utilization efficiency in pumpkin hybrids. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 17, p. 1687-1699, 1994.

SYLVESTER-BRADLEY, R.; KINDRED, D.R. Analysing nitrogen responses of cereals to prioritize routes to the improvement of nitrogen use efficiency. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 60, p. 1939-1951, 2009.

TASSO JUNIOR, L.C.; MARQUES, M.O.; CAMILOTTI, F.; SILVA, T. Extração de macronutrientes em cinco variedades de cana-de-açúcar cultivadas na região centro-norte do estado de São Paulo. **STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 25, p. 38-42, 2007.

TENNANT, T. Root growth of wheat. I. Early patterns of multiplication and extension of wheat roots including effects of leaves of nitrogen, phosphorus, and potassium. **Australian Journal of Agriculture Research**, Collingwood, v. 27, p. 183-196, 1976.

TOMEMORI, H.; HAMAMURA, K.; TANABE, K. Interactive effects of sodium and potassium on the growth and photosynthesis of spinach and komatsuna. **Plant Production Science**, Tokyo, v. 5, p. 281-285, 2002.

TSONEV, T.; VELIKOVA, V.; YILDIZ-AKTAS, L.; GÜREL, A.; EDREVA, A. Effect of water deficit and potassium fertilization on photosynthetic activity in cotton plants. **Plant Biosystems**, Oxon, v. 145, p. 841-847, 2011.

VENKATESAN, S.; GANAPATHY, M.N.K. Nitrate reductase activity in tea influenced by various levels of nitrogen and potassium fertilizers. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 35, n. 9, p. 1283-1291, 2004.

VIANA, E.M.; KIEHL, J.C. Doses de nitrogênio e potássio no crescimento do trigo. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 4, p. 975-982, 2010.

VILELA, L.; ANGHINONI, I. Morfologia do sistema radicular e cinética de absorção de fósforo em cultivares de soja afetados pela interação alumínio-fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, p. 91-96, 1984.

VIRO, M.; HAEDER, H.E. The effect of the potassium status of tomato plants on the transport of organic compounds to the fruits. In: INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE, 1971, Bern. **Potassium in biochemistry and physiology**. Bern: IPI, 1971. p. 118-124.

WANG, R.Z.; GAO, Q. Photosynthesis, transpiration, and water-use efficiency in two divergent *Leymus chinensis* populations from Northeast China. **Photosynthetica**, Prague, v. 39, p. 123-126, 2001.

WESTGATE, M.E. Water status and development of the maize endosperm and embryo during drought. **Crop Science**, Madison, v. 34, n. 1, p. 76-83, 1994.

WHITE, P.J. Improving potassium acquisition and utilization by crop plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Hoboken, v. 176, p. 305-316, 2013.

WHITE, P.J.; BROADLEY, M.R. Chloride in soils and its uptake and movement within the plant: a review. **Annals of Botany**, Oxford, v. 88, p. 967-988, 2001.

WHITE, P.J.; HAMMOND, J.P. Sucrose transport in the phloem: integrating root responses to phosphorus starvation. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 59, p. 93-109, 2008.

WOOD, A.W.; SCHROEDER, B.L. Potassium: a critical role in sugarcane production particularly in drought conditions. **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane**, Collingwood, v. 26, p. 1-11, 2004.

XI, S.; LIHUA, R.; YONGSONG, Z. QIZHAO, Y.; CAIXIAN, T.; LIANXIANG, Q. Effect of potassium fertilizer application on physiological parameters and yield of cotton grown on a potassium deficient soil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Hoboken, v. 152, p. 269-272, 1989.

YANG, X.E.; LIU, J.X.; WANG, W.M.; YE, Z.Q.; LUO, A.C. Potassium internal use efficiency relative to growth vigor, potassium distribution, and carbohydrate allocation in rice genotypes. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 27, p. 837-852, 2004.

ZHANG, Z.; TIAN, X.; DUAN, L.; WANG, B.; HE, Z.; LI, Z. Differential responses of conventional and Bt-transgenic cotton to potassium deficiency. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 30, p. 659-670, 2007.

ZHAO, D.L.; OOSTERHUIS, D.M.; BEDNARZ, C.W. Influence of potassium deficiency on photosynthesis, chlorophyll content, and chloroplast ultrastructure of cotton plants. **Photosynthetica**, Dordrecht, v.39, p. 103-109, 2001.

4 INFLUÊNCIA DO POTÁSSIO EM DOIS CULTIVARES DE CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDOS AO DÉFICIT HÍDRICO

Resumo

A utilização eficiente dos recursos naturais, tais como a água e os nutrientes exigidos ao desenvolvimento vegetal é a chave para o desenvolvimento de uma agricultura com baixo custo energético e ecologicamente sustentável. Objetivou-se com esse trabalho avaliar os atributos morfológicos da parte aérea (área foliar total e atributos de fotossíntese) e do sistema radicular (produção de massa seca de raízes, comprimento e superfície total de raízes), a eficiência de uso de K e de água em dois genótipos de cana-de-açúcar (SP83-2847 tolerante; SP90-3414 suscetível ao déficit hídrico) afetados pela deficiência do K e pelo déficit hídrico. Para isso foram elaboradas as seguintes hipóteses: 1) o suprimento de K para os genótipos de cana-de-açúcar cultivados sob deficiência hídrica contribui para minimizar os efeitos da falta de água e 2) a eficiência de uso de água (EUA) é influenciada pela eficiência de uso do K (KUE), ou seja, a maior produção de biomassa por cada unidade de água consumida pela planta é afetado pela maior utilização interna de K. O experimento foi realizado em vasos contendo 8,0 dm³ de terra proveniente de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (LVAd), utilizando o delineamento experimental de blocos completos ao acaso, com os tratamentos arranjados em esquema fatorial 2 x 2 x 2 (dois níveis de K no solo x duas variedades x dois regimes hídricos), com quatro repetições. Foram avaliados os parâmetros fotossintéticos (taxa de assimilação de CO₂ [A], condutância estomática [g_s] e transpiração [E] e eficiência intrínseca no uso da água [A/E]), o potencial da água na folha (Ψ_a), o extravasamento de eletrólitos (EE), bem como a avaliação da eficiência de uso de K, a área foliar e a produção de biomassa das plantas. Verificaram-se incrementos de 33% na A , de 50% na g_s e de 42% na E e redução de 13% na EUA do cultivar tolerante em relação ao suscetível, sob deficiência de K e déficit hídrico. Sob restrição hídrica e com nível adequado de K no solo, a área foliar do genótipo SP90-3414 correspondeu a 82,5% daquela verificada para o cultivar tolerante SP83-2847. A eficiência de uso de K no para o colmo do cultivar tolerante aumenta com a elevação do teor de K no solo e com disponibilidade de água. Plantas bem nutridas em potássio aumentam a eficiência de uso de água, favorecendo também a eficiência de uso deste elemento.

Palavras-chave: Eficiência nutricional, potencial de água da folha, condutância estomática.

POTASSIUM INFLUENCE IN TWO SUGARCANE CULTIVARS SUBMITTED TO WATER DEFICIT

Abstract

The efficient use of natural resources, such as water and nutrients required for plant development, is the key for the agriculture development with low energy cost and ecologically sustainable. The objective of this study was to evaluate the morphological attributes of shoots (total leaf area and photosynthesis attributes) and root (dry matter, total root length and total root surface), the use efficiency of potassium and water in two sugarcane genotypes (tolerant SP83-2847; SP90-3414 sensitive to water deficit) affected by the K starvation and water deficit. For this the following hypotheses were developed: 1) the K supply for sugarcane genotypes alleviate the water deficits 2) the water use efficiency (WUE) is influenced by the K use efficiency (KUE), that is, the highest biomass yield per unit of water consumed by the plant is affected by the increased internal use of K. The experiment was conducted in pots containing 8.0 dm³ of soil from a Oxisol Haplorthox (LVAd), the experimental design was randomized complete block with treatments arranged in a factorial 2 x 2 x 2 (two levels of K in the soil x two varieties x two water regimes), with four replications. Photosynthetic parameters as CO₂ assimilation rate [A], stomatal conductance [g_s] and transpiration rate [E] and intrinsic efficiency in water use [A/E]), the leaf water potential (Ψ_a), electrolyte leakage (EL), as well as the evaluation of the K use efficiency, leaf area and plant biomass production. The tolerant cultivar increases 33% of A , 50% in g_s and 42% at E and 13% reduction in WUE compared with the sensitive cultivar under K starvation and water deficit. Under water deficit and higher K level in soil, leaf area of SP90-3414 genotype corresponded to 82.5% of that observed for the tolerant cultivar SP83-2847. The K use efficiency in to stem tolerant cultivar increases with increasing K content in soil and water availability. Well K nourished plants increases the efficiency of water use.

Keywords: Nutritional efficiency, leaf water potential, stomatal conductance.

4.1 Introdução

A deficiência hídrica e o estresse nutricional são um dos principais fatores que mais limitam o desenvolvimento fisiológico dos vegetais e a produtividade das culturas. Apesar da atenção que a eficiência de uso de potássio (*KU_tE*) recebeu na literatura para diversas culturas agrícolas, pouco progresso foi feito no Brasil para a criação de genótipos com alta *KU_tE*. Ademais, poucos estudos têm investigado especificamente a relação entre *KU_tE* e a eficiência de uso de água (EUA). Em vez disso, a variação genotípica para *KU_tE* tem sido investigada em estudos que avaliam simultaneamente a eficiência de absorção de potássio (K), caracterizando a eficiência nutricional destas plantas. Portanto, a busca por genótipos eficientes na utilização desses recursos se torna cada vez mais importante, se forem considerados, não necessariamente nesta ordem de importância: 1) a alta dependência da agricultura brasileira à importação do K, 2) as projeções de crescimento populacional mundial para o ano de 2050, com cerca de 9 bilhões de habitantes; 3) a produção de alimentos deverá aumentar em cerca de 70% globalmente e quase 100% nos países em desenvolvimento e 4) estima-se que cerca de 1,2 bilhão de pessoas vivem em países e regiões com escassez de água, e a situação deverá agravar-se rapidamente, com o crescimento da população (FAO, 2009).

Com relação às eficiências de absorção e de uso, vale ressaltar que a capacidade de um genótipo em crescer e produzir em solos com baixo teor de K disponível caracteriza a eficiência nutricional, ou seja, o fenótipo eficiente. Diferenças genotípicas quanto às eficiências de absorção e de uso de K têm sido relatadas para diversas espécies vegetais de interesse agrônomico (RENGEL; DAMON, 2008). A eficiência agrônômica de uso de K tem mostrado maior correlação com a produção de grãos (ou de biomassa), de modo que os cultivares podem ser classificados como: eficientes e responsivos (ER), eficientes e não-responsivos (ENR), não-eficientes e responsivos (NER), bem como não-eficientes e não-responsivos (NENR) (FAGERIA et al., 1997; FAGERIA, 2000). Incrementos na eficiência de uso de potássio *KU_tE* podem ser alcançados agronomicamente, por meio de melhorias nas práticas de manejo de fertilizantes, ou geneticamente, por meio do cultivo de genótipos que adquirem e/ou utilizam o K de forma mais eficaz (RENGEL; DAMON, 2008). Aquisição de K pelas culturas é determinada principalmente pela liberação de K à superfície radicular e pela cinética de absorção de K (WHITE, 2013).

A água é um recurso indispensável à grande maioria das atividades econômicas, notadamente para a agricultura e indústria, com influência decisiva na qualidade de vida das populações. Administrar corretamente o uso da água nas próximas décadas será um dos maiores desafios para atender à crescente demanda de alimentos no mundo (PORTUGAL,

2001). De acordo com Prado et al. (2010), a água ocupa a posição de maior destaque num ambiente de produção, uma vez que quando limite, mesmo em solos com boa fertilidade, reduz significativamente a produtividade da cana-de-açúcar e quando adequada, desloca o ambiente de produção favoravelmente até mesmo nos solos com baixo potencial químico. Assim, estudos que contemplem maneiras de se aumentar a EUA pelos vegetais se tornam necessários tanto para a expansão das culturas para regiões de déficit hídrico, e chuvas irregulares, quanto para a prevenção de períodos secos como ocorreu nesse último ano. Muitos estudos relatam a relação positiva entre o K e o aumento da EUA pelas plantas (FAGERIA; BALIGAR; LI, 2008, ZORB; SENBAYRAM; PEITER, 2013), fato que ocorre principalmente devido às funções osmóticas desempenhadas pelo K na fisiologia vegetal (MARSCHNER, 2012).

Portanto, é possível supor que genótipos eficientes na absorção de K também são mais eficientes no uso de água. Genótipos eficientes possuem mecanismos fisiológicos específicos que permitem o acesso a quantidades suficientes de um nutriente específico (eficiência de absorção), e/ou para uma eficaz utilização do nutriente absorvido (eficiência de utilização) (SATTELMACHER et al., 1994). Comparando a resposta das plantas ao déficit hídrico e as funções atribuídas ao elemento K, é razoável supor que plantas bem nutridas nesse elemento podem aumentar a eficiência de uso de água, favorecendo a expansão da cultura para novas áreas. Porém, faltam estudos que contemplem a identificação das características morfofisiológicas das plantas sob deficiência hídrica, e se o manejo adequado do elemento K pode auxiliar no desenvolvimento dessas estratégias para tolerância à seca.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Local, período e espécie vegetal

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada no Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP), em Piracicaba - SP, no período de dezembro de 2013 a novembro de 2014. A espécie estudada foi a cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), sendo os cultivares selecionados para estudo foram: SP90-3414 e SP83-2847, sendo o cultivar SP90-3414 utilizado como padrão de susceptibilidade (GONÇALVES, 2008) e o cultivar SP83-2847 utilizado como padrão de tolerância hídrica (DEDEMO, 2006).

4.2.2 Instalação, desenvolvimento e delineamento experimental

As plantas foram obtidas a partir do plantio de um mini tolete com gema individual de cada cultivar em vasos com capacidade de 8 dm^{-3} preenchidos com terra proveniente de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (LVAd), textura franco-argilo-arenosa (EMBRAPA, 2006), coletado em área rural na cidade de Santa Maria da Serra - SP. A amostra do LVAd foi coletada em área com mínima perturbação antrópica, após a coleta as amostras foram secas ao ar e passadas em peneira de 4 mm de abertura de malha, posteriormente sub amostras denominadas de terras finas secas ao ar (TFSA) foram passadas em peneiras de 2 mm de abertura de malha, homogeneizadas, amostradas e caracterizadas (tabelas 1 e 2). Em função da fertilidade química do solo efetuou-se a correção da acidez e fertilidade, a fim de condicionar adequado desenvolvimento das plantas segundo os tratamentos escolhidos. Os perfilhos das plantas foram mantidos.

Tabela 1 – Atributos químicos ⁽¹⁾ das amostras de solo utilizado no experimento

pH CaCl ₂	MO	P resina	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m	B	Cu (DTPA)	Fe (DTPA)	Mn (DTPA)	Zn (DTPA)
	g dm^{-3}	mg dm^{-3}	mmol dm^{-3}							%	%	mg dm^{-3}				
4,1 ± 0,2	26 ± 1,2	5 ± 0,78	0,7 ± 0,05	6 ± 0,09	4 ± 0,05	7 ± 0,07	42 ± 0,96	10,7 ± 1	52,7 ± 3	20 ± 2	40 ± 0,03	0,11 ± 0,00	0,5 ± 0,01	71 ± 2,85	3,7 ± 0,88	0,7 ± 0,09

Média (n=3) ± desvio padrão. ⁽¹⁾ Raij et al. (2001)

Tabela 2 – Análise granulométrica ⁽²⁾ da amostra de solo utilizado no experimento

Areia (> 0,05 mm)	Silte (> 0,002 mm e <0,05 mm)	Argila (< 0,002 mm)
g Kg^{-1}		
635 ± 0	165 ± 8	200 ± 11

Média (n=3) ± desvio padrão. ⁽²⁾ Gee; Or (2002)

Foram consideradas duas condições de umidade do solo: 20% (déficit hídrico) e 60% (condição hídrica considerada adequada), impostas em função da determinação da capacidade máxima de armazenamento de água do solo escolhido e das pesagens diárias dos vasos - vasos somente com solo e daqueles vasos cultivados com as plantas -, em balança analítica de precisão.

Segundo o resultado da análise de fertilidade do solo, e o objetivo do experimento, foram considerados dois níveis de K: muito baixo e adequado. O teor de K original do solo já apresenta concentração muito baixa desse elemento, logo, para esse tratamento, nenhuma dose de K foi aplicada (nos gráficos de resultado esse tratamento está representado pelo valor de 1 mmol_c). Para atingir o nível adequado de K no solo foi aplicada uma dose de $6 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, parcelada em duas aplicações de KCl e uma por meio de solução estoque, evitando

possível estresse salino. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos completos ao acaso, com os tratamentos arranjados em esquema fatorial 2 x 2 x 2 (dois níveis de K no solo x dois cultivares de cana-de-açúcar x dois regimes hídricos), com quatro repetições, totalizando 32 vasos.

4.2.3 Determinação do potencial da água na folha (Ψ_a)

As medições do Ψ_a foram realizadas aos 312 dias após o início dos tratamentos (DAT) na extremidade superior da folha +2 utilizando câmara de pressão de *Scholander* (*Soil Moisture Equipment, Santa Bárbara CA, EUA*). As medições foram efetuadas entre às 17:15 horas e 18:00 horas. As leituras foram expressas em MPa.

4.2.4 Determinação do extravasamento de eletrólitos (EE)

Para determinação do EE foram coletados por unidade experimental cinco discos foliares da folha +2 (113 mm² cada), aos 303 DAT, com o auxílio de um perfurador, os quais foram lavados e acondicionados em placas de Petri contendo 20 mL de água deionizada. As placas foram fechadas e mantidas a temperatura de 25°C por um período de 90 minutos. Após esse período, a condutividade inicial no meio (X_i) foi medida usando um condutivímetro de bancada. Em seguida, as placas foram submetidas à temperatura de 80°C, por 90 minutos, em estufa de secagem e a condutividade medida novamente (X_f) (SCOTTI CAMPOS; THU PHAM THI, 1997). O extravasamento de eletrólitos é expresso como a porcentagem de condutividade em relação à condutividade total após o tratamento por 90 minutos a 80°C:

$$EE = [(X_i / X_f) \times 100]$$

4.2.5 Taxa fotossintética, condutância estomática e transpiração

Para avaliar a taxa de assimilação de CO₂, condutância estomática e transpiração, foi utilizado um analisador portátil de gases por infravermelho (*Infrared Gas Analyser – IRGA, LI 6400, Li-Cor, Inc., Lincon, NE, USA*). O fornecimento de CO₂ foi de aproximadamente 400 $\mu\text{mol mol}^{-1}$. A intensidade luminosa foi de 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, com temperatura de folha mantida entre 30°C. A avaliação foi feita no período da manhã, aos 282 DAT, na folha +3.

4.2.6 Coleta do material vegetal e avaliações de parâmetros produtivos da parte aérea

A coleta do material vegetal ocorreu aos 328 DAT quando foram identificados e separados em folhas da parte superior (FS), folhas da parte inferior (FI), colmo e raiz. Para separar as raízes do solo o mesmo foi lavado em água deionizada corrente, sendo a lavagem

realizada dentro de um jogo de peneiras granulométricas para evitar perdas de raízes durante o processo de separação.

Em seguida, as lâminas foliares (FS + FI) tiveram suas áreas foliares (AF) quantificadas com o auxílio do integrador de área foliar *LICOR*[®], modelo *LI-3100*. Posteriormente, todo o material vegetal foi colocado em sacos de papel previamente identificados e secados por 72 horas em estufa com circulação forçada de ar, a 65°C. Por fim, foi pesado, triturado em moinho tipo Wiley (peneira com diâmetro de malha de 1 mm) para determinação das concentrações de potássio.

4.2.7 Avaliações de parâmetros produtivos e morfológicos do sistema radicular

Durante o período de coleta do material vegetal separou-se aproximadamente 20% de massa fresca total de raiz, de cada unidade experimental, para avaliação do comprimento e superfície radiculares por meio do sistema *WinRHIZO Pro2013a* (*Régent Instr. Inc.*), acoplado a um *scanner* profissional *Epson XL 10000*. As raízes foram armazenadas em potes plásticos contendo água deionizada e armazenadas em câmara fria para posterior análise.

Para análise das raízes (330 DAT), as mesmas foram dispostas em uma cuba de acrílico de 30 cm de largura por 40 cm de comprimento contendo, aproximadamente, 1 cm de água deionizada. A utilização desse acessório permitiu a obtenção de imagens em três dimensões, evitando-se, também, a sobreposição das raízes. Após a digitalização, as imagens foram armazenadas como arquivos *TIFF*, para posterior acesso por meio da planilha *Excel XLRhizo* integrada ao sistema.

Após a determinação do comprimento e superfície radiculares, as subamostras foram colocadas em estufa de circulação forçada de ar, a 65°C por 72 horas pra secagem, sendo os valores de produção de massa seca somados ao material radicular pesado anteriormente. Os valores totais de comprimento e superfície radiculares foram expressos por meio de regra de três direta entre os valores de massa seca da subamostra com a massa seca total de raízes.

4.2.8 Concentração e acúmulo de potássio

A determinação da concentração de K nos tecidos vegetais (FS, FI, colmo e raiz) foi realizada utilizando-se 0,25 g de material vegetal seco e moído por meio da digestão nitro-perclórica ($\text{HNO}_3:\text{HClO}_4$, 83%:17%, 5:1 v/v) (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). A determinação da concentração de potássio ocorreu pelo método de fotometria de chama de emissão.

As quantidades acumuladas (conteúdos) de K nos tecidos vegetais foram calculadas pelo produto do teor de K com a produção de massa seca de cada parte da planta, sendo:

$$Ac_{\text{tecido}} (\text{mg}) = \text{concentração do elemento no tecido} (\text{mg kg}^{-1}) \times \text{massa seca} (\text{g})$$

4.2.9 Eficiência de uso de potássio e da água

A eficiência de utilização do potássio (*KUtE*) foi calculada a partir da fórmula descrita por Siddiqi e Glass (1981):

$$KUtE (\text{g}^2 \text{mg}^{-1}) = \text{massa seca do tecido} (\text{g}^2) / \text{acúmulo do nutriente no tecido} (\text{mg})$$

A eficiência de uso da água (EUA) foi determinada pela relação entre a taxa de assimilação de CO₂ (*A*) e a taxa de transpiração (*E*), determinadas pelo *IRGA LI-6.400XT*[®] (WANG; GAO, 2001).

$$EUA^{(1)} (\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}) = A (\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) / E (\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1})$$

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Trocas gasosas e eficiência de uso da água

Taxa de assimilação de CO₂

A taxa de assimilação de CO₂ (*A*) variou significativamente com o aumento da disponibilidade de K no solo e a condição hídrica submetida às plantas. Para o cultivar SP90-3414, suscetível ao déficit hídrico, independente da condição hídrica, a baixa disponibilidade de K no solo promoveu reduções na taxa fotossintética das plantas, sendo essas reduções equivalentes a 63% em condição hídrica normal e 42% em condição de restrição hídrica (figura 1A). Porém, para o cultivar SP83-2847, apenas quando submetido a condição de restrição hídrica, é que foi observado diferenças significativas entre as doses de K disponíveis no solo em relação a *A*, sendo que a baixa disponibilidade desse nutriente promoveu um aumento de 48% nesse parâmetro (figura 1B).

Considerando o efeito da condição hídrica imposta às plantas, os dois cultivares apresentaram padrão semelhante, ou seja, apenas quando desenvolvidos em condição de alta disponibilidade de K no solo observaram-se diferenças significativas em *A*, sendo que a restrição hídrica reduziu em 47% a taxa fotossintética do cultivar SP90-3414 (figura 1A) e de 66% para o cultivar SP83-2847 (figura 1B).

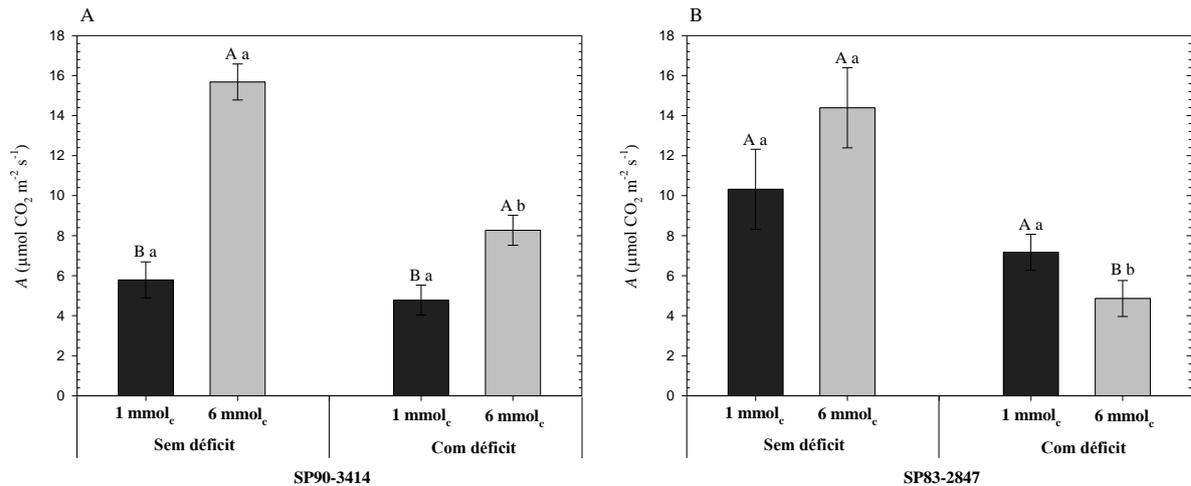


Figura 1 - Taxa de assimilação de CO₂ (A) do cultivar suscetível SP90-3414 (A) e tolerante SP83-2847 (B), em função da disponibilidade hídrica e de potássio no substrato. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro de mesma condição hídrica) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos da condição hídrica imposta (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

Condutância estomática

A condutância estomática (g_s) variou significativamente com o aumento da disponibilidade de K no solo e a condição hídrica submetida as plantas. Para o cultivar SP90-3414, submetido a condição hídrica normal, a baixa disponibilidade de K no solo promoveu redução de 57% na g_s (figura 2A). Porém, as plantas do cultivar SP83-2847, submetidas a condição hídrica normal, apresentaram redução de 43% na g_s quando desenvolvidas em condição de baixa disponibilidade de K, mas quando submetidas a condição de restrição hídrica, a baixa disponibilidade de K no solo promoveu aumento de 300% na g_s (figura 2B).

Considerando o efeito da condição hídrica imposta as plantas, os dois cultivares apresentaram padrões semelhantes, ou seja, apenas quando desenvolvidos em condição de alta disponibilidade de K no solo observaram-se diferenças significativas em g_s , sendo que a restrição hídrica reduziu em 57% a condutância do cultivar SP90-3414 (figura 2A) e em 86% para o cultivar SP83-2847 (figura 2B).

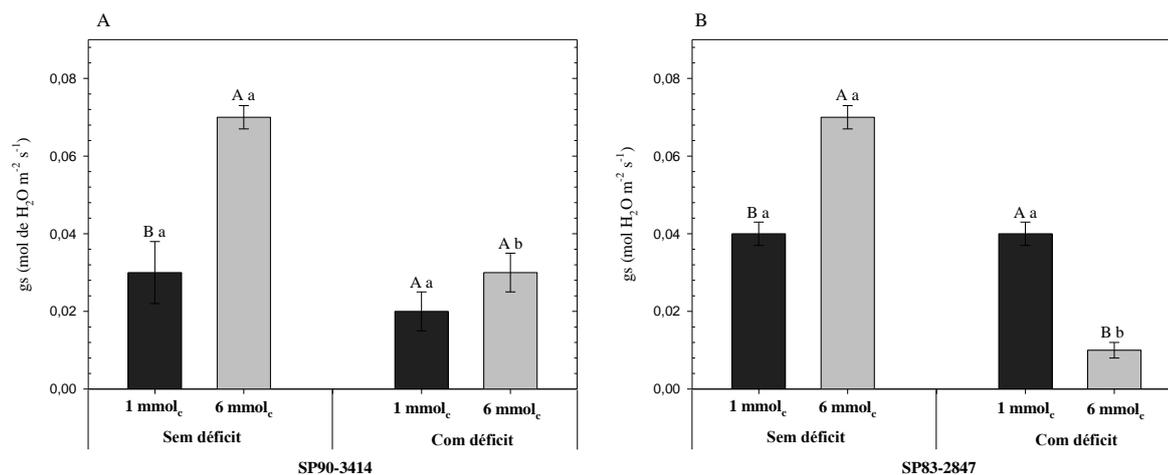


Figura 2 - Condutância estomática (g_s) do cultivar suscetível SP90-3414 (A) e tolerante SP83-2847 (B), em função da disponibilidade hídrica e de potássio no substrato. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro da mesma condição hídrica) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos da condição hídrica imposta (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

Taxa de transpiração

A taxa de transpiração (E) variou significativamente com o aumento da disponibilidade de K no solo e a condição hídrica submetida as plantas. Para o cultivar SP90-3414, submetido a condição hídrica normal, a baixa disponibilidade de K no solo reduziu em 57% a E (figura 3A), já para o cultivar SP83-2847, apenas quando submetido a condição de restrição hídrica (déficit), é que observou-se diferença estatística em relação a disponibilidade de K no solo, sendo que a plantas desse cultivar desenvolvidas em condição de baixa disponibilidade apresentaram aumento de 255% na E (figura 3B).

Considerando o efeito da condição hídrica imposta as plantas, os dois cultivares apresentaram padrões semelhantes, ou seja, apenas quando desenvolvidos em condição de alta disponibilidade de K no solo observaram-se diferenças significativas em E , sendo que a restrição hídrica reduziu em 55% a transpiração do cultivar SP90-3414 (figura 3A) e em 84% para o cultivar SP83-2847 (figura 3B).

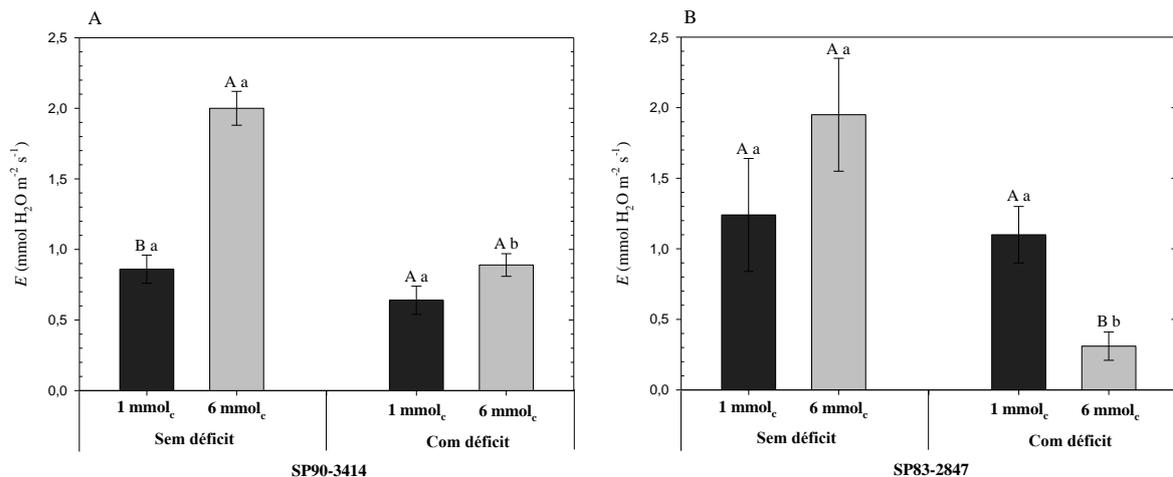


Figura 3 - Transpiração (E) do cultivar suscetível SP90-3414 (A) e tolerante SP83-2847 (B), em função da disponibilidade hídrica e de potássio no substrato. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro da mesma condição hídrica) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos da condição hídrica imposta (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

Eficiência de uso da água

Foi verificada interação estatística entre os níveis de K no solo e a eficiência de uso de água (EUA) apenas para o cultivar SP83-2847, considerado tolerante a restrição hídrica, quando submetido a condição de deficiência hídrica, e desenvolvido em condição de baixa disponibilidade de K, reduziu em 58% sua eficiência de uso de água em relação as plantas desenvolvidas em condições adequadas de suprimento potássico (figura 4B). Em relação ao efeito promovido pela restrição hídrica sob a EUA, somente o cultivar SP83-2847, quando desenvolvido em condições normais de disponibilidade de K, apresentou uma redução significativa de 53% na EUA em condições hídricas normais do que quando submetido ao estresse hídrico (figura 4B).

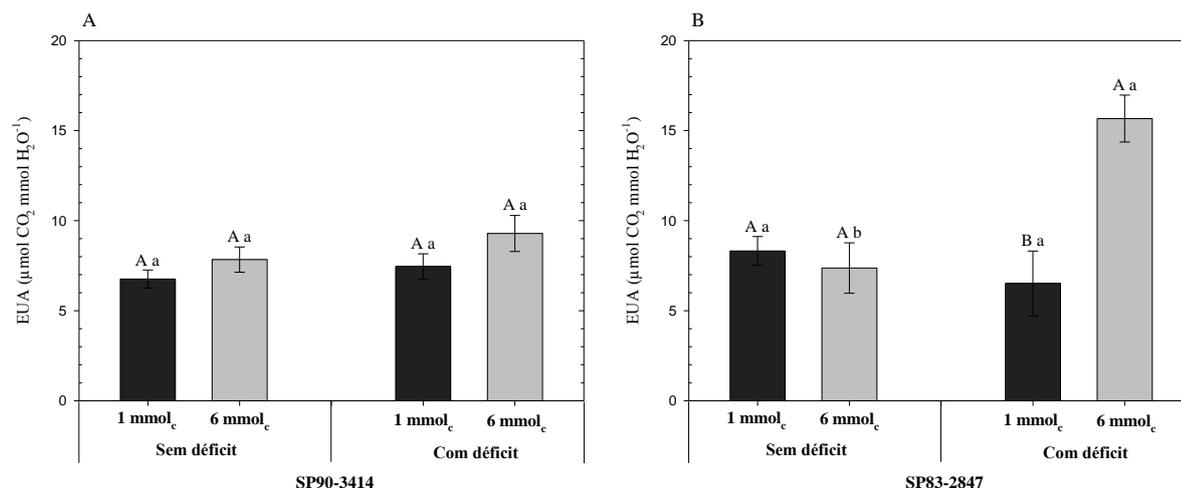


Figura 4 - Eficiência do uso da água (EUA) do cultivar suscetível SP90-3414 (A) e tolerante SP83-2847 (B), em função da disponibilidade hídrica e de potássio no substrato. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro da mesma condição hídrica) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos da condição hídrica imposta (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

Os resultados demonstram uma relação entre o K, a condição hídrica e os parâmetros de trocas gasosas (A , g_s e E). É possível observar que, quando as concentrações de K disponíveis no solo foram baixas, não houve alterações nas trocas gasosas das plantas submetidas ao estresse hídrico em relação àquelas desenvolvidas em condições hídricas normais, resultado observado nos dois cultivares estudados e que se relacionam com as funções desempenhadas pelo K nos parâmetros g_s e E . Como já descrito e discutido no 1º experimento, o K exerce influência principalmente na g_s e E , devido sua participação no processo de abertura e fechamento estomático, promovendo, assim, diferenciações em A (MARSCHNER, 2012). Portanto, a baixa disponibilidade de K no desenvolvimento dos cultivares já havia limitado os resultados referentes às trocas gasosas, tanto em plantas submetidas a condição hídrica normal quanto naquelas submetidas ao estresse hídrico, não sendo possível observar diferenças significativas entre elas. As diferenças entre a condição hídrica submetida e os valores das trocas gasosas apareceram quando as plantas foram desenvolvidas em condições de alta disponibilidade de K no solo, não havendo, porém, diferenças entre o comportamento dos cultivares SP90-3414 e SP83-2847. A redução dos valores de A , g_s e E em plantas submetidas ao estresse hídrico está principalmente relacionada com o processo de abertura e fechamento estomático, realizada afim de minimizar a perda de água pelas plantas (LARCHER, 2004). Smit e Singels (2006) relataram reduções significativas na g_s de dois cultivares de cana-de-açúcar submetidos ao estresse hídrico, assim como Arias, Delgado e Carmenate (1996) relataram para E e Gonçalves et al. (2010) para A .

Esses resultados também podem ser observados para a cultura do milho (BERGONCI; PEREIRA, 2002) e sorgo (NABLE; ROBERTSON; BERTHELSEN, 1999).

Em condições de déficit hídrico os cultivares apresentaram padrões diferentes em relação à disponibilidade de K e as trocas gasosas. Egilla, Davies Junior e Boutton (2005) demonstraram que plantas de hibiscos (*Hibiscus rosa-sinensis* cv. Leprechaun), quando submetidas à condição de déficit hídrico, apresentaram aumentos nos valores de A , g_s e E com o aumento da disponibilidade de K no meio de desenvolvimento, assim como observado por Battie-Laclau et al. (2014) para os parâmetros A e g_s em plantas de eucalipto, resultados semelhantes aos apresentados pelo cultivar SP90-3414. Segundo Beltrame (2005), este cultivar possui alta resposta ao aumento da fertilidade do solo, assim, com o aumento da concentração de K no solo e, conseqüentemente sua disponibilidade, este cultivar aumentou significativamente A e apresentou tendências de aumento para os parâmetros g_s e E em condições de restrição hídrica no solo. Porém, os resultados apresentados pelo cultivar SP83-2847 demonstram um padrão diferente do apresentado pelo SP90-3414, ou seja, em condição de déficit hídrico, o aumento da disponibilidade de K reduziu os parâmetros de trocas gasosas. Benlloch-González et al. (2008) estudaram o efeito da restrição hídrica em diversos parâmetros fisiológicos de plantas de girassol e oliveira demonstrando que, para essas espécies o aumento da concentração de K promove reduções nos parâmetros g_s e E , e que casos de deficiência moderada de K não promovem danos irreparáveis nos estômatos, não prejudicando as trocas gasosas das plantas. Resultados semelhante foram verificados para a cultura da cana-de-açúcar (SUDAMA et al., 1998) e do trigo (BRAG, 1972). Dessa forma, pela caracterização do cultivar SP83-2847 segundo Dinardo-Miranda, De Vasconcelos e Landell (2010), a baixa exigência nutricional e sua rusticidade explicam o fato de que em baixa disponibilidade de K esse cultivar apresentar melhores parâmetros de trocas gasosas. De uma maneira geral, se compararmos os resultados dos dois cultivares é possível perceber que o cultivar SP83-2847 apresenta, quando desenvolvido em baixa concentração de K, resultados melhores para os parâmetros de trocas gasosas que o cultivar SP90-3414, porém aumentando a disponibilidade de K no solo o oposto pode ser observado.

A tolerância ao déficit hídrico promovido pela adequada disponibilidade de K está relacionada com a redução na E das plantas (QUINTERO et al., 1998; FAROOQ et al., 2009). A EUA calculada no presente estudo leva em consideração a relação A/E , sendo assim os efeitos ocasionados pelo K na redução de E são de grande importância para o resultado de EUA. Arias et al. (1996) afirmam que em cana-de-açúcar existe grande variabilidade na forma como as plantas usam a água, pois a relação entre assimilação de CO_2 e consumo de água

pode ser afetada por fatores genotípicos e do ambiente onde vivem, sendo que a melhor relação entre absorção de CO_2 e consumo de água ocorre quando os estômatos estão parcialmente fechados (LARCHER, 2004). O cultivar SP83-2847 apresentou o maior valor de EUA quando desenvolvido em condição de alta disponibilidade de K e submetido ao déficit hídrico, isso ocorre, pois a redução de E , promovida pelo aumento da concentração de K, foi maior que a redução verificada em A , logo a taxa de assimilação de CO_2 por unidade de água se torna maior nesse cultivar desenvolvido nessas condições, caracterizando-o como tolerante ao déficit hídrico. Para o cultivar SP90-3414 é possível verificar uma tendência de aumento na EUA quando a concentração de K no solo é incrementada, porém a redução de E pelo aumento da disponibilidade de K não é tão evidente como àquela encontrada para o outro cultivar, não promovendo assim, variações significativas.

4.3.2 Relações hídricas nas folhas

Potencial da água na folha

Foi verificado para o cultivar SP90-3414, suscetível ao déficit hídrico, que em condição de ausência de restrição hídrica, porém, com baixa disponibilidade de K no solo, obteve-se o maior valor de potencial hídrico (Ψ_a) na folha (figura 5A). Para o cultivar SP83-2847, tolerante ao déficit hídrico, tanto quando submetido a restrição hídrica quanto em condições hídricas normais, as plantas desenvolvidas em alta disponibilidade de K apresentaram maiores valores de Ψ_a foliar, sendo esse aumento relativo a 44% em condições hídricas normais e 41% em condições de déficit hídrico (figura 5B).

Em relação aos efeitos promovidos pela condição hídrica, independente da dose a qual as plantas do cultivar SP90-3414 foram submetidas, os valores de Ψ_a foliar foram maiores quando não houve restrição hídrica no desenvolvimento, apresentando aumentos no Ψ_a das folhas de 108% em condições de baixa disponibilidade de K e 59% em condições de alta disponibilidade (figura 5A). Porém, para o cultivar SP83-2847, apenas quando as plantas foram desenvolvidas em condições de baixa disponibilidade de K é que houve diferenças estatísticas para a condição hídrica imposta, sendo o Ψ_a foliar 11% maior com a imposição da restrição hídrica (figura 5B).

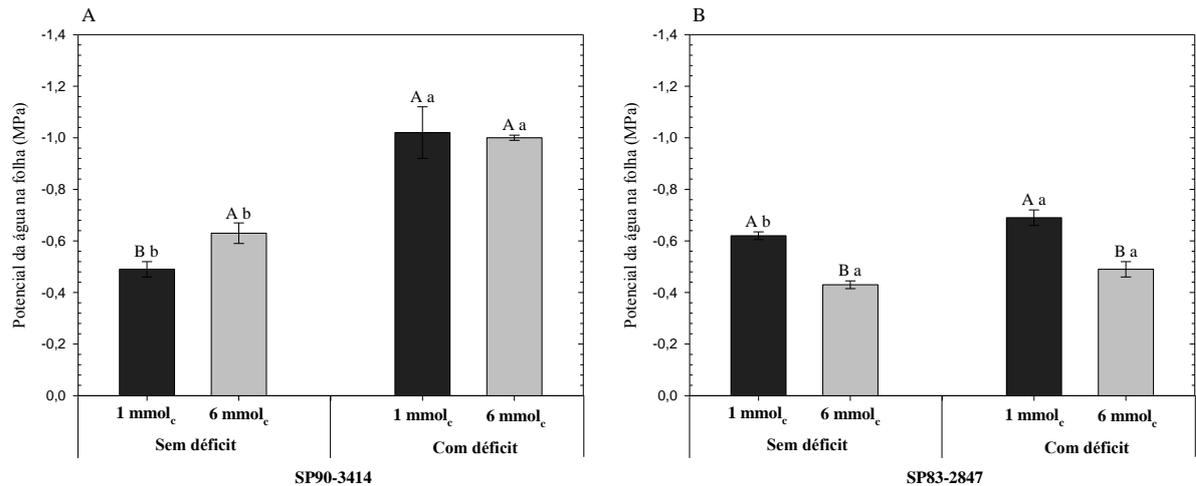


Figura 5 - Potencial da água (Ψ_a) na folha do cultivar suscetível SP90-3414 (A) e tolerante SP83-2847 (B), em função da disponibilidade hídrica e de potássio no substrato. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro da mesma condição hídrica) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos da condição hídrica imposta (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

Extravasamento de eletrólitos

A porcentagem de extravasamento de eletrólitos (%EE) do cultivar SP90-3414 diminuiu com o aumento da disponibilidade de K no solo, sendo que em condições hídricas normais a redução foi de 18% e em condições de déficit hídrico a redução foi de 50% (figura 6A). Para o cultivar SP83-2847, quando submetido a condição hídrica normal, observou-se aumento de 14% na %EE com o aumento da disponibilidade de K no solo, porém em condições de déficit hídrico, o aumento da disponibilidade de K promoveu redução de 32% na %EE (figura 6B).

Em relação aos efeitos promovidos pela condição hídrica, o cultivar SP90-3414, quando desenvolvido em condição de baixa disponibilidade de K, apresentou valor 44% maior de %EE quando submetido ao déficit hídrico, porém quando as plantas foram desenvolvidas em condições de alta disponibilidade de K, àquelas sem restrições hídricas apresentaram valor 13% maior em relação às plantas sob condições de restrição (figura 6A). Para o cultivar SP83-2847, apenas em condições de alta disponibilidade de K no solo é que a condição hídrica promoveu diferenças significativas na %EE, sendo que as plantas desenvolvidas sem restrição hídrica apresentaram 65% maior valor de %EE do que àquelas desenvolvidas sob déficit hídrico (figura 6B).

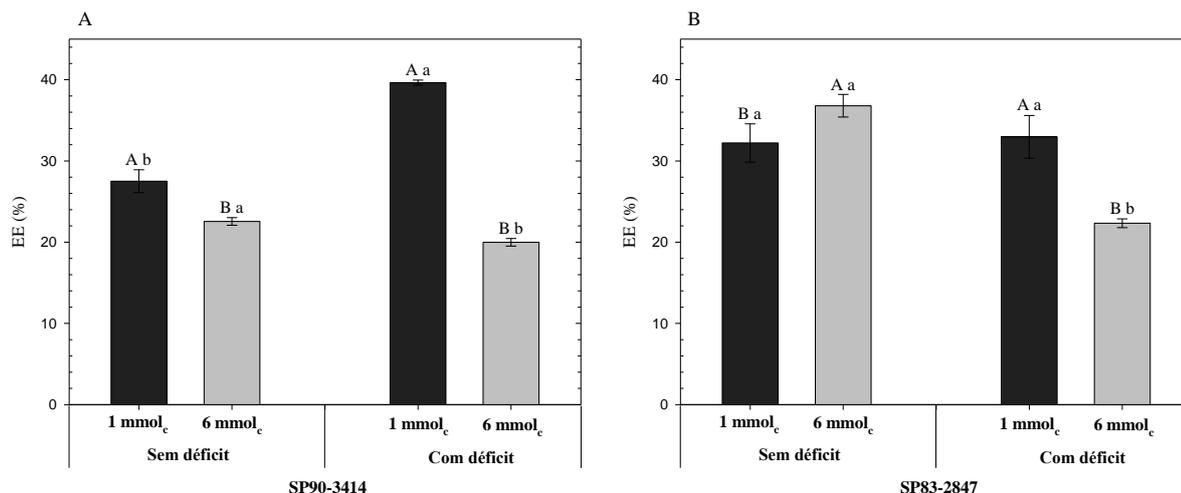


Figura 6 - Extravasamento de eletrólitos (%EE) do cultivar suscetível SP90-3414 (A) e tolerante SP83-2847 (B), em função da disponibilidade hídrica e de potássio no substrato. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro da mesma condição hídrica) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos da condição hídrica imposta (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

O Ψ_a da folha descreve o estado energético dela, cujos gradientes explicam os fluxos da água no sistema solo-planta-atmosfera (BERGONCI et al., 2000) e que permitem avaliar o desempenho das plantas em condição de restrição hídrica. Machado et al. (2009) estudaram a influência da restrição hídrica no Ψ_a na folha em dois genótipos de cana-de-açúcar, demonstrando que, quando submetidos ao déficit hídrico no solo, o Ψ_a foliar diminuiu em ambos os cultivares, fato que, segundo Nawaz et al. (2012), está relacionado ao acúmulo de solutos nas células e que pode sofrer variações genótípicas de resposta. Considerando a função fisiológica desempenhada pelo K no ajuste osmótico das plantas, e conseqüentemente em sua manutenção hídrica, é possível verificar que a concentração de K influencia no Ψ_a foliar das plantas, promovendo aumentos significativos em determinados cultivares, indicando assim melhorias em seu estado hídrico em condição de restrição hídrica. Resultados apresentados para a cultura do milho mostram que, em condição de déficit hídrico, o Ψ_a na folha se mantém constante com o adequado suprimento potássico (MAQSOOD et al., 2013).

Segundo Silva et al. (2007) a estabilidade da membrana celular tem correlações fortes como indicador de tolerância ao estresse causado pela limitação hídrica. Quando os parâmetros hídricos indicam baixa disponibilidade de água para o desenvolvimento das plantas, muitos distúrbios fisiológicos começam a ocorrer, sendo a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS) um deles. Aumentos na produção de ROS em plantas hidricamente estressadas são bem conhecidas e relacionadas à alteração no processo de fixação de CO₂ (QUARTACCI et al., 1994; JIANG; ZHANG, 2002), sendo assim, plantas

desenvolvidas em baixas concentrações de K tendem a aumentar a produção de ROS devido aos distúrbios promovidos pela deficiência de K na abertura estomática, nas relações hídricas das plantas e no processo fotossintético (MENGEL; KIRKBY, 2001; MARSCHNER, 2012).

Portanto, o aumento da severidade da restrição hídrica resulta em aumentos correspondentes na demanda de K para manutenção da fotossíntese e proteção dos cloroplastos contra danos oxidativos, gerando a degradação das membranas e promovendo aumentos na %EE (SCANDALIOS, 2005). Premachandra, Saneoka e Ogata (1991) avaliando a estabilidade de membrana celular em folhas de plantas de milho, cultivadas sob déficit hídrico e suplementadas com K, observaram que este parâmetro aumentou nas plantas nutridas com K em relação às plantas deficientes em K quando submetidas à deficiência hídrica.

4.3.3 Concentração de acúmulo de potássio

Concentração de potássio nas folhas, colmos e raízes

As concentrações de K nas folhas superiores (FS) e inferiores (FI) incrementaram com o aumento da disponibilidade de K no solo, nos cultivares SP90-3414 e SP83-2847. Para o cultivar SP90-3414, quando submetido a condição hídrica normal, o aumento da disponibilidade de K no solo promoveu aumento de 182% na concentração de K nas FS (figura 7A) e 1.273% nas FI (figura 7C), no entanto, em condições de restrição hídrica (déficit) os aumentos observados na concentração de K nesse cultivar, devido ao aumento da disponibilidade de K, foram de 107% nas FS (figura 7A) e 2.400% nas FI (figura 7C). O mesmo padrão foi observado para o cultivar SP83-2847, ou seja, a concentração de K nas FS aumentou em 429% (figura 7B) e a concentração da FI aumentou em 512% (figura 7D) com o aumento da disponibilidade de K no solo em condições hídricas normais. Considerando as plantas submetidas ao déficit hídrico, os aumentos foram de 352% para as FS (figura 7B) e 1.703% para as FI (figura 7D), em relação ao aumento da disponibilidade de K no solo.

Com relação aos efeitos promovidos pela condição hídrica na concentração de K nas FS e FI, para o cultivar SP90-3414 houve somente diferença na concentração de K nas FS quando as plantas foram desenvolvidas em condições de baixa disponibilidade de K, sendo observado um aumento de 38% na concentração de K nas FS de plantas submetidas ao déficit hídrico (figura 7A). Para o cultivar SP83-2847, tanto a concentração de K nas FS, quanto nas FI foram maiores nas plantas submetidas ao déficit hídrico, quando desenvolvidas em condições de alta disponibilidade de K, sendo esse aumento relativo a 6% nas FS (figura 7B) e 13% nas FI (figura 7D). Porém, quando desenvolvidas em condições de baixa

disponibilidade de K, apenas foram observadas diferenças significativas para as FI, sendo que a concentração de K foi reduzida em 62% com a imposição do déficit hídrico (figura 7D).

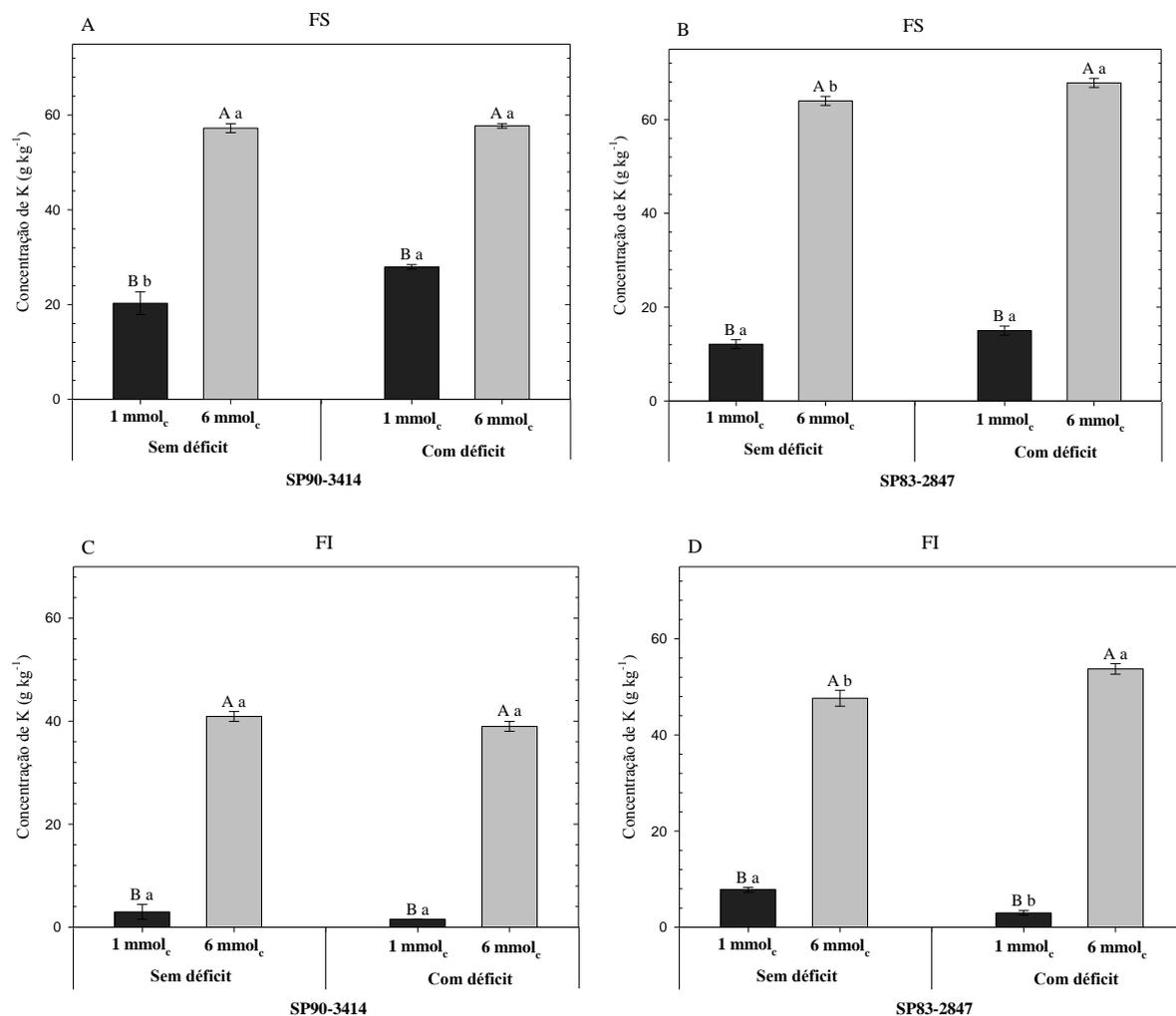


Figura 7 - Concentração de K nas folhas superiores do cultivar suscetível SP90-3414 (A) e tolerante SP83-2847 (B), e nas folhas inferiores (C) e (D) para os cultivares suscetível e tolerante respectivamente, em função da disponibilidade hídrica e de potássio no substrato. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro da mesma condição hídrica) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos da condição hídrica imposta (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

A concentração de K nos colmos do cultivar SP90-3414 aumentou com o incremento da disponibilidade de K no solo, independente da condição hídrica imposta, sendo que em condição hídrica normal o aumento observado foi de 4.154% e em condições de déficit 1.596% (figura 8A). Para o cultivar SP83-2847, os resultados seguiram o mesmo padrão, ou seja, o aumento da disponibilidade de K no solo promoveu o aumento da concentração de K

nos colmos, independente da condição hídrica, sendo esse aumento proporcional a 542% em condições hídricas normais e 330% nas plantas desenvolvidas sob déficit hídrico (figura 8B).

Com relação aos efeitos promovidos pela condição hídrica submetida às plantas, os cultivares SP90-3414 e SP83-2847 apresentaram resultados semelhantes, sendo que os dois cultivares, quando desenvolvidos em condições de baixa ou alta disponibilidade de K, apresentaram maiores concentrações de K nos colmos das plantas submetidas ao déficit hídrico, sendo esse aumento de 651% e 200% para o cultivar SP90-3414 em condições de baixa e alta disponibilidade de K, respectivamente (figura 8A), e 210% e 108% para o SP83-2847 (figura 8B), também em condições de baixa e alta disponibilidade de K no solo, respectivamente.

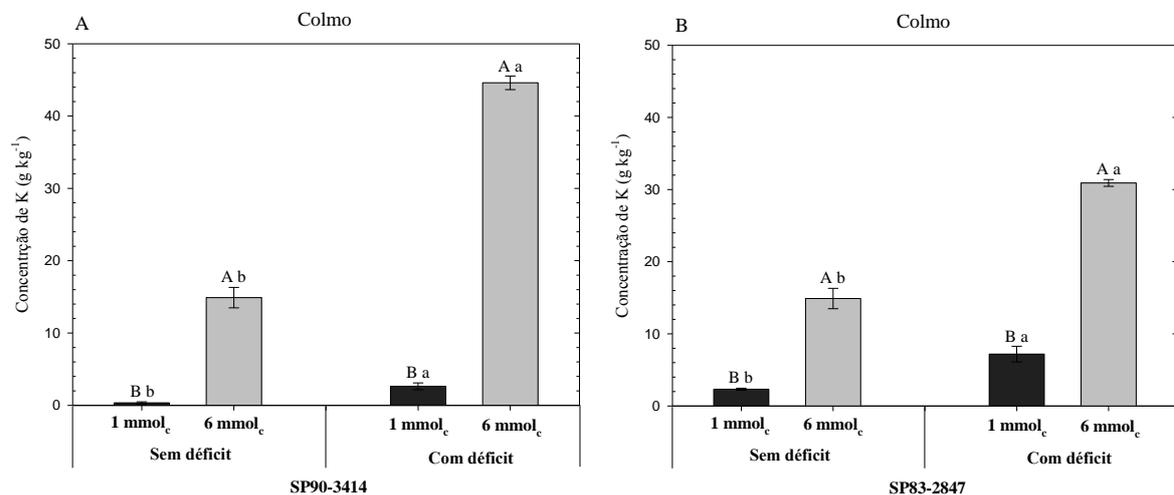


Figura 8 - Concentração de K nos colmos do cultivar suscetível SP90-3414 (A) e tolerante SP83-2847 (B), em função da disponibilidade hídrica e de potássio no substrato. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro da mesma condição hídrica) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos da condição hídrica imposta (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

A concentração de K nas raízes dos cultivares SP90-3414 e SP83-2847 aumentaram com o aumento da disponibilidade de K no solo, independente da condição hídrica a qual as plantas foram submetidas. Para o cultivar SP90-3414, em condição hídrica normal, a concentração de K nas raízes aumentou em 3.231% com o aumento da disponibilidade de K no solo, já em condições de restrição hídrica o aumento observado foi de 59% (figura 9A). Porém, para as plantas do cultivar SP83-2847 os aumentos observados foram de 946% em condição hídrica normal e 519% em condição de déficit hídrico (figura 9B). Com relação aos efeitos promovidos pela condição hídrica submetida as plantas, quando desenvolvidas em condições de baixa disponibilidade de K, os dois cultivares apresentaram maiores

concentrações de K nas raízes das plantas submetidas ao déficit hídrico, sendo esse aumento, em relação as plantas sem estresse, 786% para o cultivar SP90-3414 (figura 9A) e 266% para o SP83-2847 (figura 9B). Porém, quando desenvolvidos em condições de alta disponibilidade de K no solo, o cultivar SP90-3414 reduziu em 58% a concentração de K nas raízes (figura 9A) quando submetido a restrição hídrica, enquanto que o cultivar SP83-2847 apresentou um aumento de 117% (figura 9B) nessas mesmas condições.

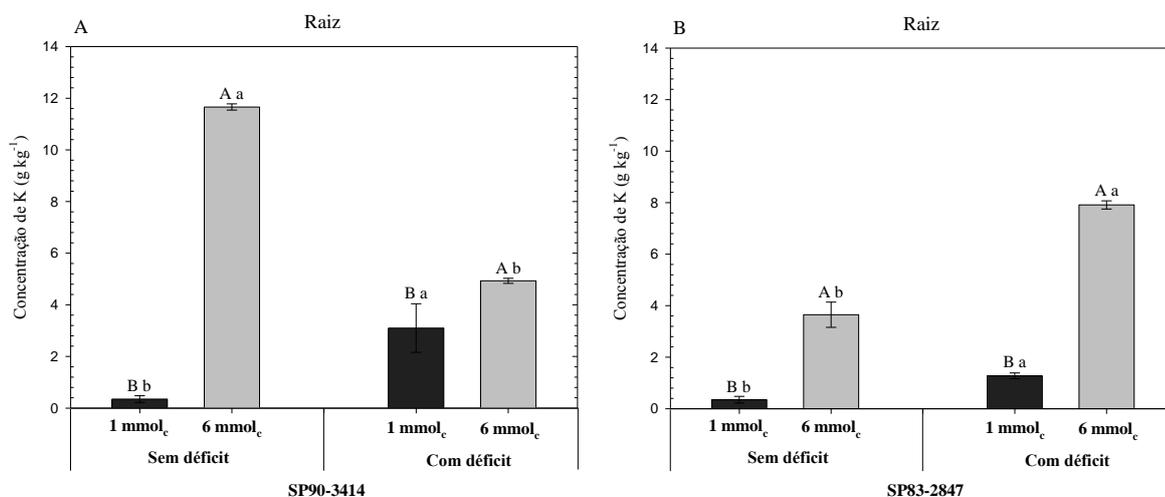


Figura 9 - Concentração de K nas raízes do cultivar suscetível SP90-3414 (A) e tolerante SP83-2847 (B), em função da disponibilidade hídrica e de potássio no substrato. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro da mesma condição hídrica) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos da condição hídrica imposta (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

Acúmulo de potássio nas folhas, colmos e raízes

O acúmulo de K nas folhas superiores (FS) e inferiores (FI) seguiram o mesmo padrão conforme a disponibilidade de K no solo e a condição hídrica a qual as plantas foram submetidas. Para o cultivar SP90-3414, o aumento da disponibilidade de K aumentou em 33 vezes o acúmulo de K nas FS quando as plantas foram submetidas a condição hídrica normal, e em 11 vezes quando submetidas ao déficit hídrico (figura 10A), para as FI os aumentos foram proporcionais a 45 vezes em condições hídricas normais e 44 vezes em condições de déficit (figura 10C). Para o cultivar SP83-2847, o aumento da disponibilidade de K aumentou em 10 vezes o acúmulo de K nas FS em condições hídricas normais e 13 vezes em condições de déficit hídrico (figura 10B), para as FI os aumentos foram proporcionais a 59 vezes em condições normais e 24 vezes em condições de restrição hídrica (figura 10D).

O padrão de semelhança se manteve entre os cultivares quando a comparação foi feita pela condição hídrica imposta as plantas dentro da mesma dose disponível de K, sendo que para as FS os maiores acúmulos foram encontrados nas plantas submetidas ao déficit hídrico. Porém, para as FI, apenas houve diferença estatística quando as plantas se desenvolveram em condição de alta disponibilidade de K, sendo as plantas submetidas à condição hídrica normal aquelas que apresentaram os maiores acúmulos de K.

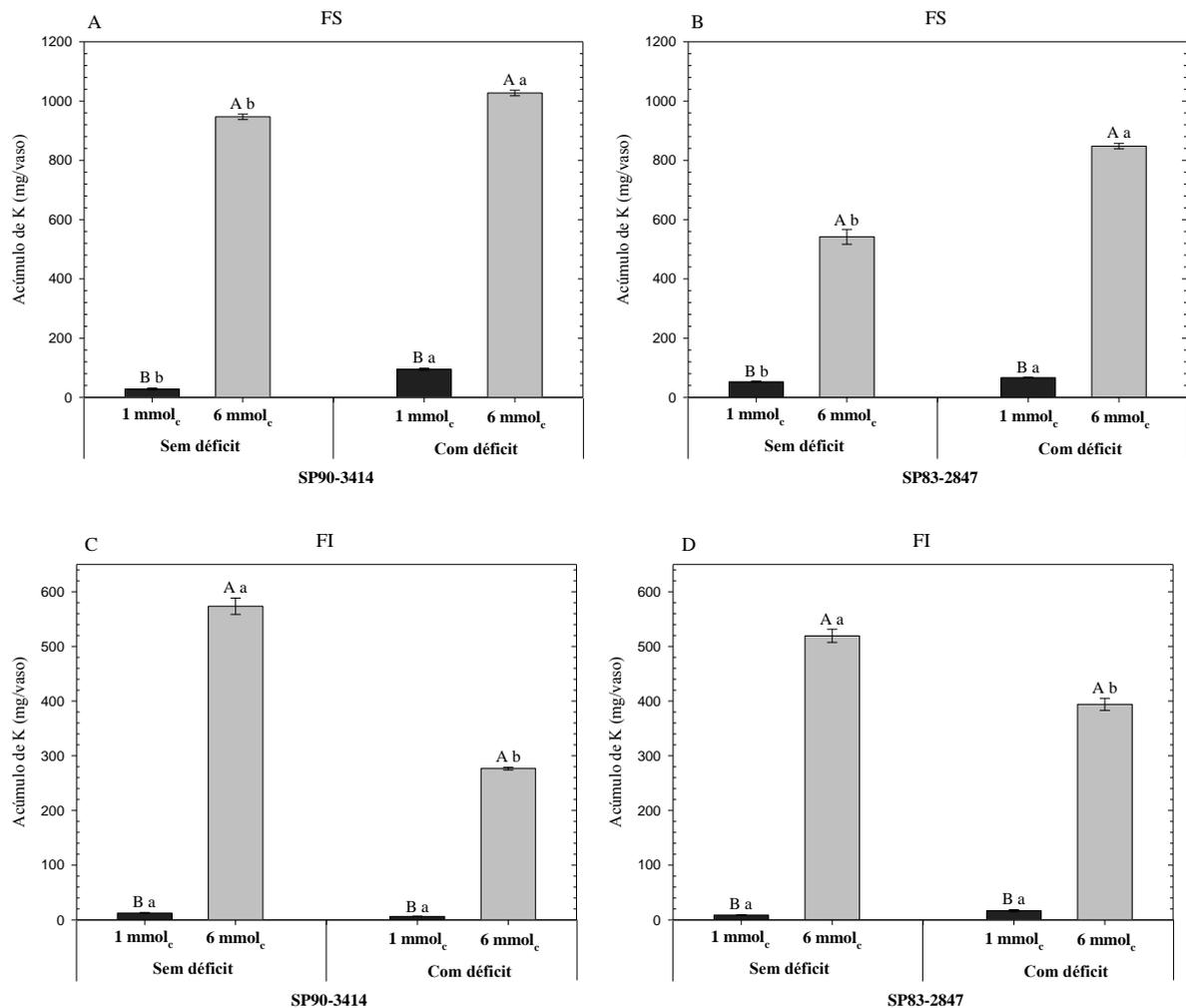


Figura 10 - Acúmulo de K nas folhas superiores do cultivar suscetível SP90-3414 (A) e tolerante SP83-2847 (B), e nas folhas inferiores (C) e (D) para os cultivares suscetível e tolerante respectivamente, em função da disponibilidade hídrica e de potássio no substrato. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro da mesma condição hídrica) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos da condição hídrica imposta (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

O acúmulo de K nos colmos também seguiu o mesmo padrão para os dois cultivares quando a comparação foi realizada a partir do incremento da disponibilidade de K no solo. Para o cultivar SP90-3414, o aumento da disponibilidade de K aumentou em 373 vezes o

acúmulo de K nos colmos quando as plantas foram submetidas a condição hídrica normal, e em 25 vezes quando submetidas ao déficit hídrico (figura 11A). Para o cultivar SP83-2847, o aumento da disponibilidade de K aumentou em 3 vezes o acúmulo de K nos colmos em condições hídricas normais e 5 vezes em condições de déficit (figura 11B).

Comparando apenas o efeito da condição hídrica no acúmulo de K nos colmos de cada cultivar observou-se que, quando as plantas do cultivar SP90-3414 foram desenvolvidas em condições de baixa disponibilidade de K, o acúmulo de K apresentado pelos colmos das plantas submetidas a restrição hídrica foi 18 vezes maior em relação àquelas desenvolvidas em condições sem restrição (figura 11A), o mesmo padrão foi observado para as plantas dos cultivares SP90-3414 e SP83-2847 desenvolvidos em condições de alta disponibilidade de K, ou seja, quando submetidas ao déficit hídrico essas plantas apresentaram maior acúmulo de K nos colmos do que àquelas desenvolvidas em condições hídricas normais.

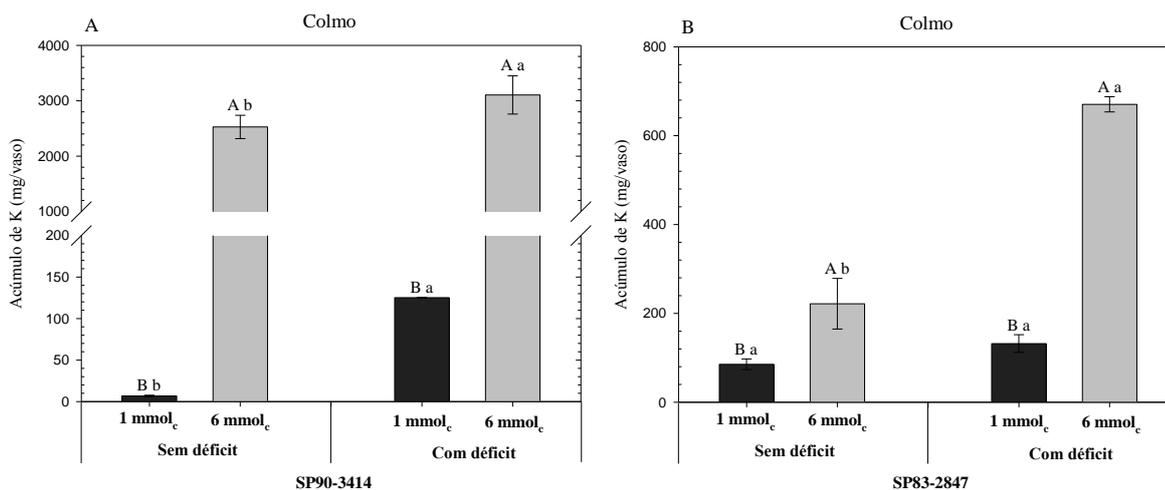


Figura 11 - Acúmulo de K nos colmos do cultivar suscetível SP90-3414 (A) e tolerante SP83-2847 (B), em função da disponibilidade hídrica e de potássio no substrato. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro da mesma condição hídrica) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos da condição hídrica imposta (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

O acúmulo de K nas raízes do cultivar SP90-3414 aumentou com o incremento da disponibilidade de K no solo, sendo observado um aumento de 389 vezes em condição hídrica normal e 5 vezes em condição de restrição hídrica (figura 12A). Para as plantas do cultivar SP83-2847 não foi observado o mesmo padrão, pois em condição hídrica normal o incremento da disponibilidade de K no solo reduziu o acúmulo de K nas raízes desse cultivar, porém quando as plantas foram submetidas ao déficit hídrico esse incremento proporcionou um aumento de 2 vezes no acúmulo de K das raízes (figura 12B).

Comparando apenas o efeito da condição hídrica no acúmulo de K nas raízes, o cultivar SP90-3414, quando desenvolvido em condição de alta disponibilidade de K no solo, apresentou um acúmulo 10 vezes maior em condições hídricas normais do que quando submetido ao déficit (figura 12A). Para o cultivar SP83-2847, desenvolvido em condição de baixa disponibilidade de K, o maior acúmulo de K nas raízes foi verificado nas plantas desenvolvidas em condições hídricas normais, porém quando desenvolvidas em alta disponibilidade de K o acúmulo de K encontrado nas plantas com restrição hídrica foi 2 vezes maior (figura 12B).

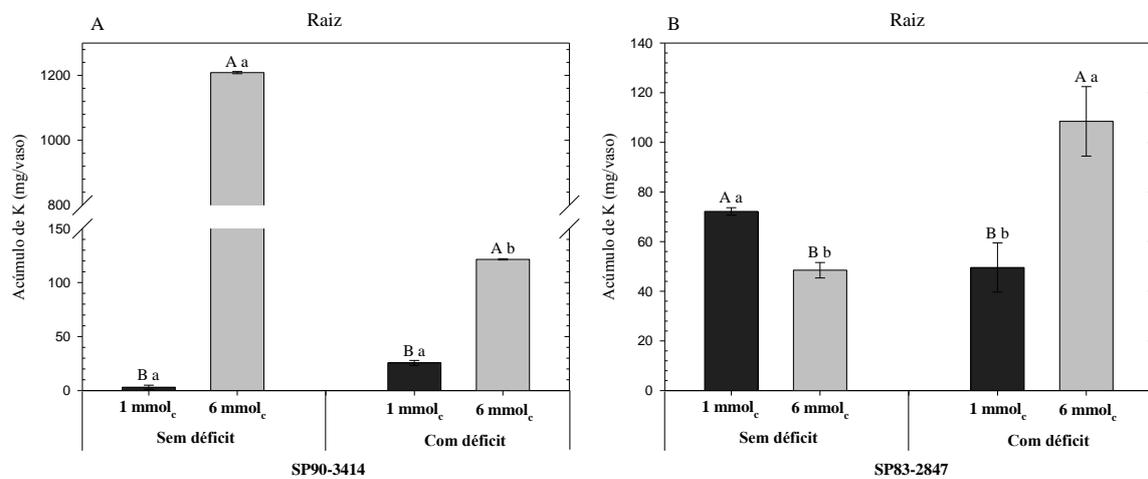


Figura 12 - Acúmulo de K nas raízes do cultivar suscetível SP90-3414 (A) e tolerante SP83-2847 (B), em função da disponibilidade hídrica e de potássio no substrato. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro da mesma condição hídrica) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos da condição hídrica imposta (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

4.3.4 Parâmetros produtivos e morfológicos da parte aérea

Produção de massa seca de folhas (FS + FI) e colmos

A produção de massa seca (MS) de folhas variou, nos dois cultivares analisados, significativamente com o aumento da disponibilidade de K no solo. Para o cultivar SP90-3414, quando desenvolvido em condição de alta disponibilidade de K, verificou-se um aumento na produção de MS foliar de 659% quando submetido a condição hídrica normal e 158% em condição de déficit (figura 13A). Para o cultivar SP83-2847 o mesmo padrão foi observado, ou seja, quando desenvolvido em condição de alta disponibilidade de K a produção de MS foliar aumentou em 104% em condição hídrica normal e 106% em condição de restrição hídrica (figura 13B).

Comparando o efeito da condição hídrica dentro de cada dose de K verificou-se que, para o cultivar SP90-3414, desenvolvido em baixa disponibilidade de K no solo, a restrição hídrica aumentou a produção de MS foliar em 125%, porém, quando desenvolvido em condição de alta disponibilidade de K o déficit hídrico reduziu a produção de MS em 23% (figura 13A).

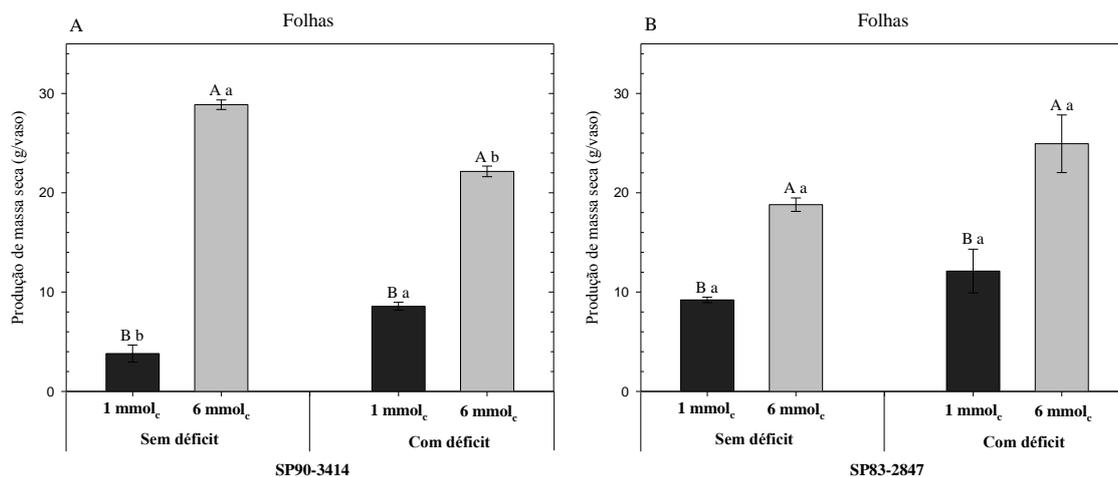


Figura 13 - Produção de massa seca das folhas do cultivar suscetível SP90-3414 (A) e tolerante SP83-2847 (B), em função da disponibilidade hídrica e de potássio no substrato. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro da mesma condição hídrica) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos da condição hídrica imposta (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

A produção de MS dos colmos variou, nos dois cultivares analisados, significativamente com o aumento da disponibilidade de K no solo. Para o cultivar SP90-3414, quando desenvolvido em alta disponibilidade de K, verificou-se um aumento na produção de MS dos colmos de 625% quando submetido a condição hídrica normal e 737% em condição de déficit (figura 14A). Para o cultivar SP83-2847 o mesmo padrão foi observado, ou seja, quando desenvolvido em condição de alta disponibilidade de K a produção de MS dos colmos aumentou em 1.429% em condição hídrica normal e 1.691% em condição de restrição hídrica (figura 14B).

Comparando o efeito da condição hídrica dentro de cada dose de K verificou-se que, para o cultivar SP90-3414 a restrição hídrica promoveu redução na produção de MS dos colmos, sendo essa redução proporcional a 43% quando as plantas foram desenvolvidas em condição de baixa disponibilidade de K, e de 34% em condição de alta disponibilidade desse nutriente (figura 14A). O mesmo padrão foi observado para o cultivar SP83-2847, ou seja, a restrição hídrica promoveu reduções de 53% na produção de colmos das plantas

desenvolvidas em condição de baixa disponibilidade de K, e de 44% quando desenvolvidas em condição de alta disponibilidade (figura 14B).

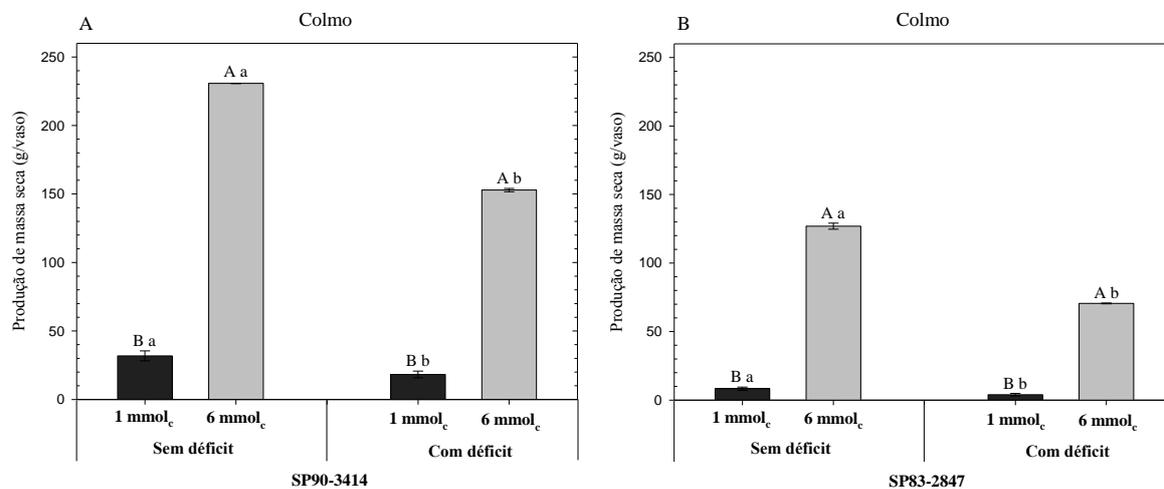


Figura 14 - Produção de massa seca dos colmos do cultivar suscetível SP90-3414 (A) e tolerante SP83-2847 (B), em função da disponibilidade hídrica e de potássio no substrato. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro da mesma condição hídrica) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos da condição hídrica imposta (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

Área foliar total

A área foliar dos dois cultivares variou significativamente com o aumento da disponibilidade de K no solo. Para o cultivar SP90-3414, quando desenvolvido em condição de alta disponibilidade de K, verificou-se um aumento da área foliar total de 628% quando submetido a condição hídrica normal e 174% em condição de restrição hídrica (figura 15A). Para o cultivar SP83-2847 o mesmo padrão foi observado, ou seja, quando desenvolvido em condição de alta disponibilidade de K a área foliar total aumentou em 95% em condição hídrica normal e 84% em condição de restrição hídrica (figura 15B).

Comparando o efeito da condição hídrica dentro de cada dose de K verificou-se que, para o cultivar SP90-3414 a restrição hídrica promoveu um aumento de 121% na área foliar das plantas desenvolvidas em condição de baixa disponibilidade de K, porém reduziu em 17% a área foliar daquelas desenvolvidas em condição de alta disponibilidade (figura 15A). Para as plantas do cultivar SP83-2847, em condição de restrição hídrica, os resultados de área foliar foram maiores tanto em condição de baixa disponibilidade de K (36%) quanto em condição de alta disponibilidade (28%) quando comparado a área foliar apresentada pelas plantas submetidas a condição hídrica normal (figura 15B).

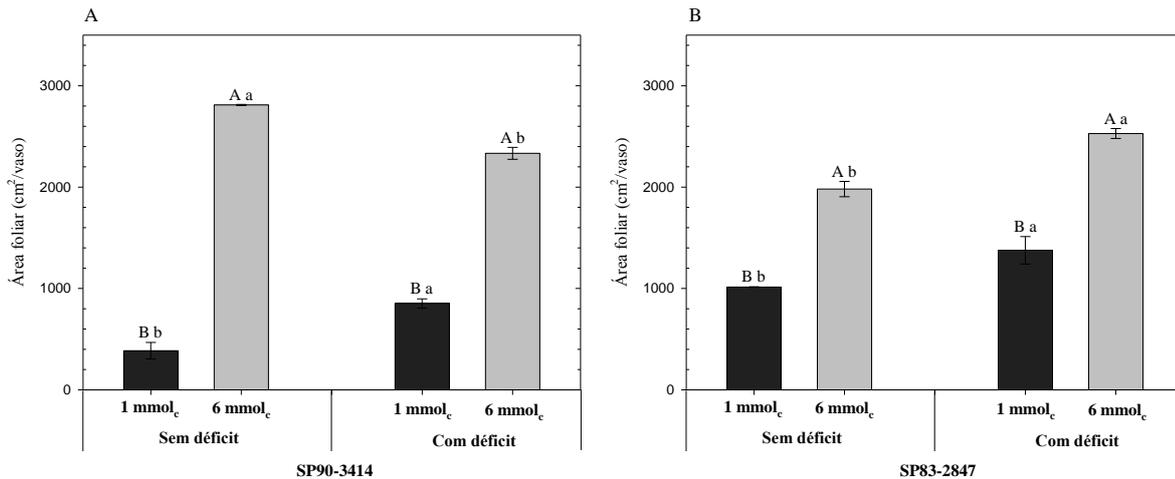


Figura 15 - Área foliar total do cultivar suscetível SP90-3414 (A) e tolerante SP83-2847 (B), em função da disponibilidade hídrica e de potássio no substrato. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro da mesma condição hídrica) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos da condição hídrica imposta (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

A restrição hídrica promoveu o aumento da produção de massa seca (MS) de folhas e na área foliar (AF) em quase todos os tratamentos. Machado et al. (2009) apresentaram em seu estudo um gráfico mostrando o número de folhas verdes de dois cultivares de cana-de-açúcar submetidos a restrição hídrica, sendo possível observar que ao final do experimento (aproximadamente 200 DAP) o número de folhas verdes foi maior nas plantas submetidas a restrição hídrica em relação àquelas controle, sugerindo apesar da falta de resultados, maior produção de MS de folhas nessa condição. Porém, esse resultado não condiz com a maioria apresentado na literatura, quando a redução da disponibilidade hídrica no solo promove reduções significativas nos parâmetros de produção de MS de folhas e AF dos vegetais (PANDEY; MARANVILLE; CHETIMA, 2000; GE et al., 2012). O incremento da disponibilidade de K no solo, como já discutido no primeiro experimento, promove aumentos significativos nos parâmetros produtivos da parte aérea e AF. Adicionalmente, com os resultados apresentados pelo presente experimento é possível afirmar que, mesmo em condição de restrição hídrica, esses benefícios são observados. Egilla, Davies Junior e Drew (2001) demonstraram que, o aumento da concentração de K promoveu aumentos significativos na produção de massa seca de folhas, e na AF, de plantas de hibisco submetidas a restrição hídrica, melhorando seu desenvolvimento nessas condições, resultado semelhante ao da AF foi encontrado no desenvolvimento de três cultivares de oliveiras (BENLLOCH-GONZALEZ et al., 2008). Diversas variáveis influenciam a AF da cana-de-açúcar, tal como o número de folhas verdes, o tamanho e a largura destas folhas e a

eficiência fotossintética delas, além da influência dos genótipos e dos fatores ambientais (OLIVEIRA et al, 2007), porém é possível estabelecer uma relação entre a produção de MS das folhas e a AF apresentada por elas, como demonstrado no presente experimento, quando a concentração de K no solo foi determinante para esses parâmetros. Lindhauer (1985) relatou que a boa nutrição potássica não apenas aumenta a massa seca total da planta e sua área foliar, mas também melhora a retenção de água nos tecidos vegetais em condição de estresse hídrico.

Para a produção de MS dos colmos é possível notar que, independente da disponibilidade de K no solo, as plantas desenvolvidas em condição hídrica normal apresentaram maiores valores de produção. Comparando os dois cultivares é possível notar que, em termos produtivos, o cultivar SP90-3414 se destaca em relação ao SP83-2847. Maschio (2011) estudando o efeito de dois manejos de irrigação, T100 (reposição total da evapotranspiração) e T70 (reposição de 70% do T100), em diversos cultivares de cana-de-açúcar, demonstrou que a produção de biomassa do colmo para o cultivar SP90-3414 (suscetível) foi maior que o produzido pelo cultivar SP83-2847, em ambas as condições hídricas, apresentando um aumento de 12% e 3%, respectivamente a T100 e T70. Quando desenvolvidos em condição de restrição hídrica, também foi possível observar o efeito benéfico do aumento da disponibilidade de K no solo na produção de MS dos colmos nos dois cultivares. Dalri e Cruz (2008) apresentaram resposta positiva na produção de MS de colmos de cana-de-açúcar em resposta ao aumento da aplicação de K via fertirrigação,

4.3.5 Parâmetros produtivos e morfológicos do sistema radicular

Produção da massa seca radicular

A produção de MS das raízes variou, nos dois cultivares analisados, significativamente com o aumento da disponibilidade de K no solo. Para o cultivar SP90-3414, quando desenvolvido em alta disponibilidade de K, verificou-se um aumento na produção de MS das raízes de 1.062% quando submetido a condição hídrica normal e 1.205% em condição de déficit (figura 16A). Para o cultivar SP83-2847 o mesmo padrão foi observado, ou seja, quando desenvolvido em condição de alta disponibilidade de K a produção de MS das raízes aumentou em 706% em condição hídrica normal e 1.207% em condição de restrição hídrica (figura 16B).

Comparando o efeito da condição hídrica dentro de cada dose de K verificou-se que, para o cultivar SP90-3414 a restrição hídrica promoveu redução na produção de MS das raízes, sendo essa redução proporcional a 49% quando as planta foram desenvolvidas em condição de baixa disponibilidade de K, e de 43% em condição de alta disponibilidade desse

nutriente (figura 16A). O mesmo padrão foi observado para o cultivar SP83-2847, ou seja, a restrição hídrica promoveu reduções de 71% na produção de MS radicular das plantas desenvolvidas em condição de baixa disponibilidade de K, e de 53% quando desenvolvidas em condição de alta disponibilidade (figura 16B).

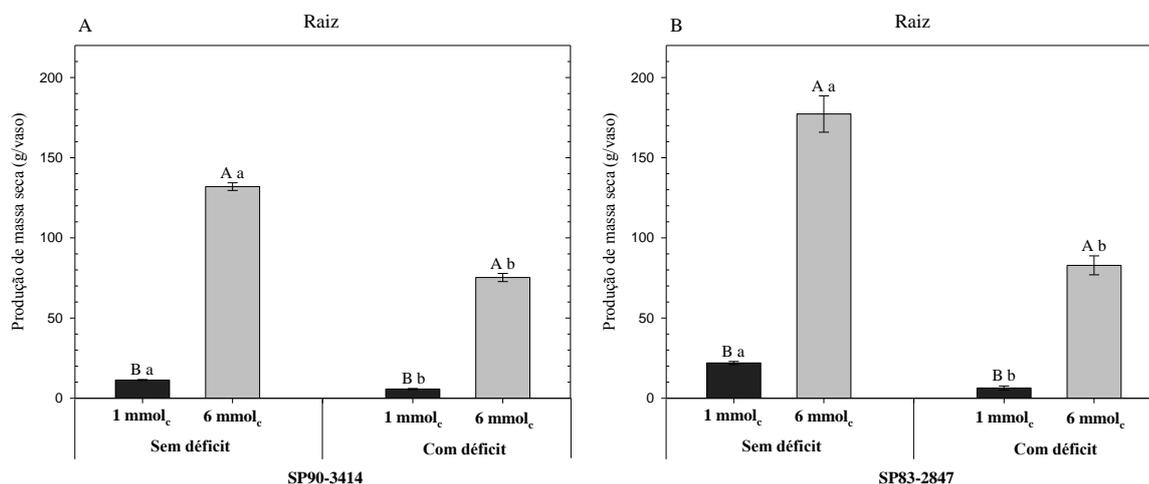


Figura 16 - Produção de massa seca das raízes do cultivar suscetível SP90-3414 (A) e tolerante SP83-2847 (B), em função da disponibilidade hídrica e de potássio no substrato. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro da mesma condição hídrica) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos da condição hídrica imposta (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

Comprimento e superfície radicular

O comprimento total de raízes variou significativamente com o aumento da disponibilidade de K no solo, independente da condição hídrica. Para o cultivar SP90-3414, quando desenvolvido em alta disponibilidade de K, verificou-se um aumento de 15 vezes no comprimento radicular das plantas submetidas a condição hídrica normal, e de 9 vezes em condição de déficit hídrico (figura 17A). Para o cultivar SP83-2847 observou-se o mesmo padrão, ou seja, quando desenvolvido em condição de alta disponibilidade de K o comprimento radicular aumentou em 5 vezes em condição hídrica normal e 9 vezes quando submetido ao déficit hídrico (figura 17B).

Comparando o efeito da condição hídrica dentro de cada dose de K verificou-se que, para o cultivar SP90-3414, quando desenvolvido em condição de alta disponibilidade de K, a restrição hídrica promoveu redução de 18% no comprimento total de raízes (figura 17A). Para o cultivar SP83-2847, independente da dose, o déficit hídrico promoveu reduções significativas no comprimento radicular, sendo essa redução proporcional a 57% em condição de baixa disponibilidade de K e 21% e condição de alta disponibilidade (figura 17B).

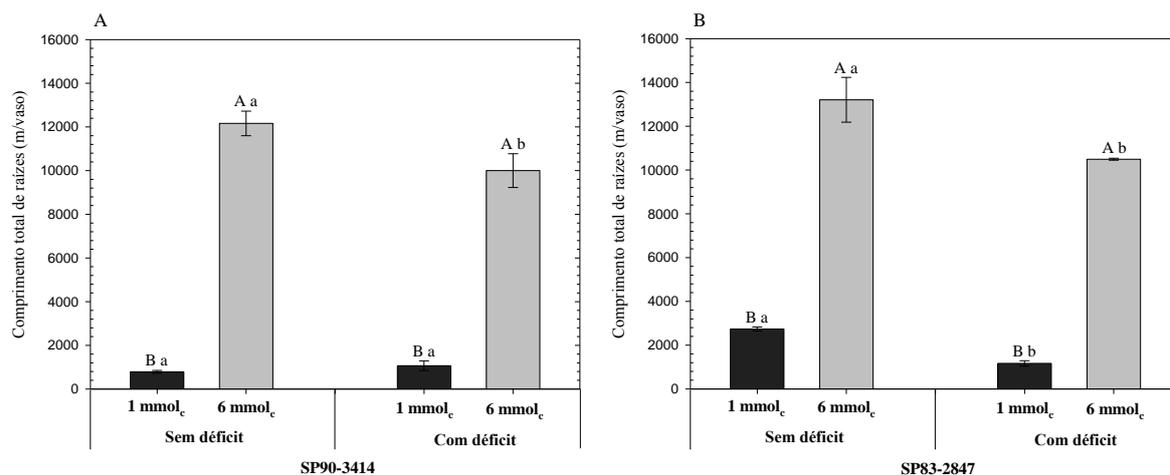


Figura 17 - Comprimento radicular do cultivar suscetível SP90-3414 (A) e tolerante SP83-2847 (B), em função da disponibilidade hídrica e de potássio no substrato. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro da mesma condição hídrica) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos da condição hídrica imposta (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

A superfície total de raízes também variou significativamente com o aumento da disponibilidade de K no solo, independente da condição hídrica. Para o cultivar SP90-3414, quando desenvolvido em condição de alta disponibilidade de K, verificou-se um aumento de 16 vezes na superfície total de raízes das plantas submetidas a condição hídrica normal, e de 10 vezes em condição de déficit hídrico (figura 18A). Para o cultivar SP83-2847 observou-se o mesmo padrão, ou seja, quando desenvolvido em condição de alta disponibilidade de K no solo a superfície radicular aumentou em 5 vezes em condição hídrica normal e 8 vezes quando submetido ao déficit hídrico (figura 18B).

Comparando o efeito da condição hídrica dentro de cada dose de K verificou-se que, para o cultivar SP90-3414, quando desenvolvido em condição de alta disponibilidade de K, a restrição hídrica reduziu em 39% a superfície total de raízes (figura 18A). Para o cultivar SP83-2847, independente da dose, o déficit hídrico promoveu reduções significativas na superfície radicular, sendo essa redução proporcional a 67% em condição de baixa disponibilidade de K e 44% em condição de alta disponibilidade (figura 18B).

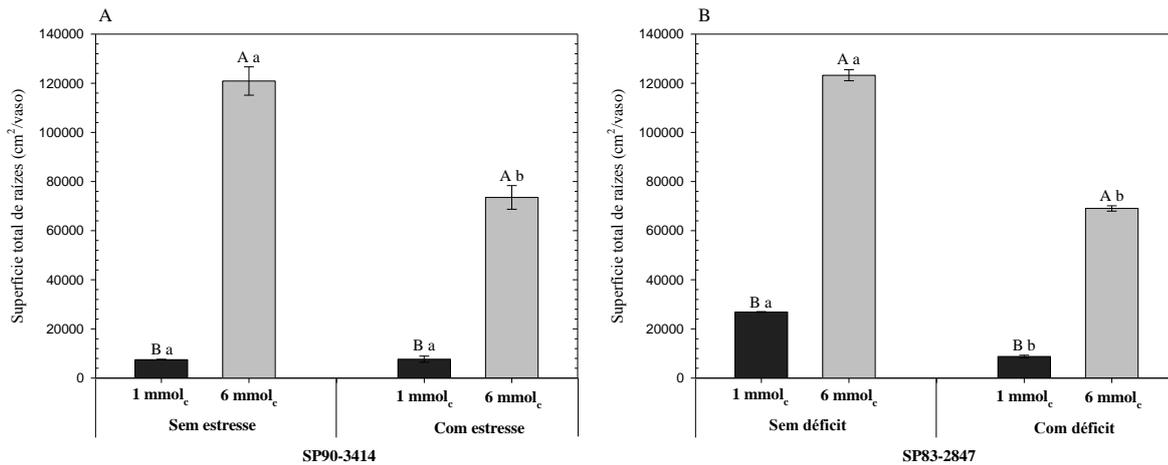


Figura 18 - Superfície radicular do cultivar suscetível SP90-3414 (A) e tolerante SP83-2847 (B), em função da disponibilidade hídrica e de potássio no substrato. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro da mesma condição hídrica) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos da condição hídrica imposta (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

As raízes são órgão chave nas relações hídricas das plantas, pois desempenham funções importantes na aquisição de água e nutrientes do solo. Assim, a morfologia e distribuição espacial do sistema radicular são muito sensíveis ao conteúdo disponível de água (XUE et al., 2003). A habilidade da planta em alterar sua morfologia radicular em busca de água é essencial para evitar déficits hídricos e manter seu desenvolvimento em locais onde a água é um fator limitante (KING et al., 2003). Em condição de restrição hídrica foi possível observar os efeitos positivos que o K exerceu sobre os parâmetros produtivos e morfológicos do sistema radicular, ou seja, o aumento da disponibilidade de K no solo permitiu as plantas aumentarem a MS do sistema radicular, bem como aumentar seu comprimento e superfície, permitindo que essas plantas explorem um maior volume de solo e uma maior profundidade.

Baque et al. (2006) demonstraram, em experimento desenvolvido em condições controladas, que a restrição hídrica do solo promoveu reduções significativas na produção de MS radicular em cultivares de trigo, porém essas reduções foram relativamente menores quando aumentaram a disponibilidade de K no solo, demonstrando assim, o efeito positivo da adubação potássica nas raízes de plantas desenvolvidas em condição de déficit hídrico.

Valadabadi e Farahani (2010) encontraram aumentos significativos no comprimento radicular de plantas de sorgo submetidas ao déficit hídrico quando houve aumento na disponibilidade de K no solo. Concordando com os resultados observados no presente experimento.

4.3.6 Eficiência de uso de potássio

Eficiência de uso de potássio pelas folhas

A eficiência de uso de K (KU_tE) pelas folhas variou significativamente com o aumento da disponibilidade de K no solo apenas quando as plantas foram submetidas a restrição hídrica. Para o cultivar SP90-3414, quando submetido ao déficit hídrico, o aumento da disponibilidade de K no solo reduziu a KU_tE pelas folhas em 87% (figura 19A). O cultivar SP83-2847 apresentou resultados semelhantes, sendo que em condição de restrição hídrica o aumento da disponibilidade de K no solo reduziu em 87% a KU_tE pelas folhas (figura 19B).

Comparando o efeito da condição hídrica dentro de cada dose de K verificou-se que, para o cultivar SP90-3414, quando desenvolvido em condição de alta disponibilidade de K, a restrição hídrica reduziu em 34% a KU_tE das folhas, porém, quando desenvolvido em baixa concentração de K a restrição hídrica aumentou em 390% a KU_tE das folhas (figura 19A). Para o cultivar SP83-2847 só houve diferença quando as plantas desenvolveram-se em condição de baixa disponibilidade de K, quando a restrição hídrica aumentou 707% a KU_tE das folhas desse cultivar (figura 19B).

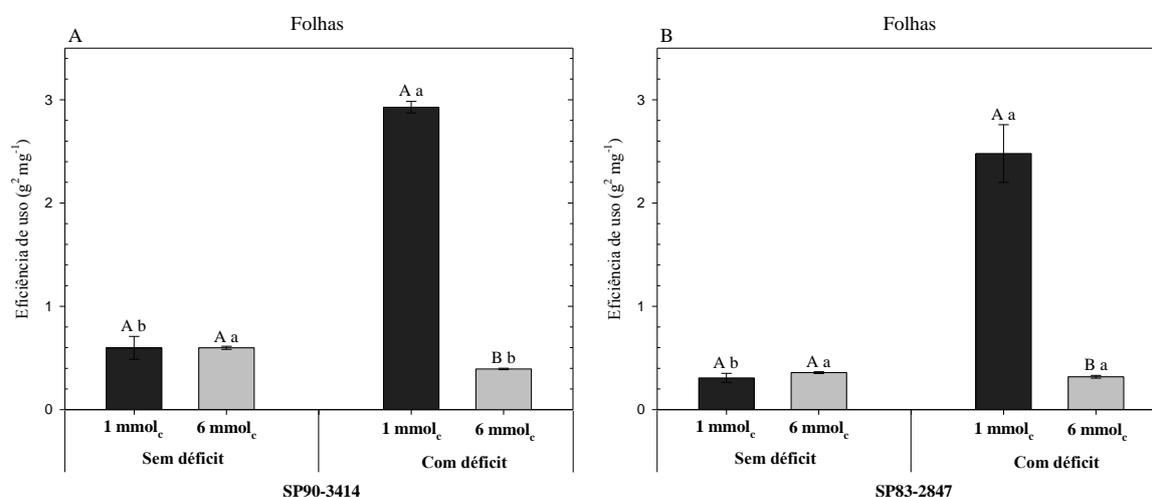


Figura 19 - Eficiência de uso de K (KU_tE) nas folhas do cultivar suscetível SP90-3414 (A) e tolerante SP83-2847 (B), em função da disponibilidade hídrica e de potássio no substrato. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro da mesma condição hídrica) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos da condição hídrica imposta (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

Eficiência de uso de K pelos colmos

A KU_tE dos colmos do cultivar SP90-3414 diminuiu com o incremento da disponibilidade de K no solo e em condições hídricas normais, apresentando redução de 67% (figura 20A), já para o cultivar SP83-2847, tanto em condições hídricas normais ou com

déficit, o aumento da disponibilidade de K no solo aumentou a *KUtE* dos colmos em 13 vezes quando submetido à condição hídrica normal e em 55 vezes em condições de déficit hídrico (figura 20B).

Comparando o efeito da condição hídrica dentro de cada dose de K verificou-se que, com relação a *KUtE* dos colmos do cultivar SP90-3414, em condições de baixa ou alta disponibilidade de K os valores foram maiores quando as plantas foram submetidas a condição hídrica normal, sendo esses valores 597% em condições de baixa disponibilidade de K e 290% em condições de alta disponibilidade (figura 20A). Porém para o cultivar SP83-2847, apenas houve diferença estatística quando as plantas foram desenvolvidas em condições de baixa disponibilidade de K, sendo àquelas sem restrição hídrica 410% maior do que as plantas desenvolvidas com déficit (figura 20B).

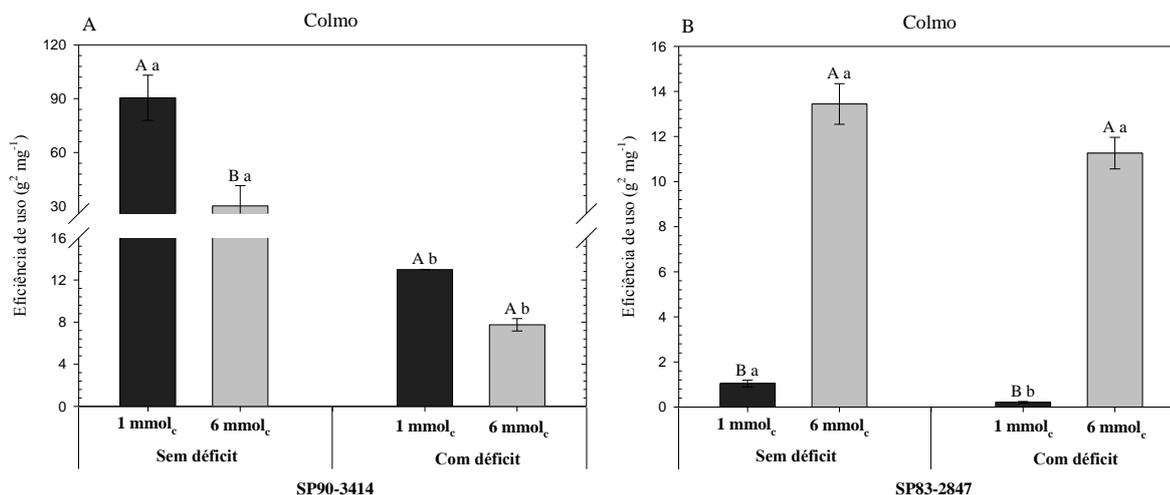


Figura 20 - Eficiência de uso de K (*KUtE*) nos colmos do cultivar suscetível SP90-3414 (A) e tolerante SP83-2847 (B), em função da disponibilidade hídrica e de potássio no substrato. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro da mesma condição hídrica) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos da condição hídrica imposta (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

Eficiência de uso de K pelas raízes

Para as raízes, a *KUtE* do cultivar SP90-3414, em condição hídrica normal, diminuiu em 78% com o incremento da disponibilidade de K no solo, porém, em condições de déficit hídrico, esse incremento promoveu aumento de 315% na *KUtE* das raízes (figura 21A). Para o cultivar SP83-2847, o aumento da disponibilidade de K no solo promoveu aumento na *KUtE* das raízes, sendo esse aumento de 175 vezes em condição hídrica normal e 80 vezes em condições de restrição hídrica (figura 21B).

Comparando o efeito da condição hídrica dentro de cada dose de K verificou-se que, a *KUtE* das raízes do cultivar SP90-3414, quando desenvolvido em baixa disponibilidade de K, foi maior nas plantas sem restrição hídrica (1.048%), porém quando desenvolvidas em condição de alta disponibilidade de K, as plantas sem restrições reduziram em 40% a *KUtE* das raízes (figura 21A). Para o cultivar SP83-2847 a condição hídrica influenciou apenas as plantas desenvolvidas em condições de alta disponibilidade de K no solo, sendo as plantas sem restrição hídrica àquelas que apresentaram um valor 784% maior (figura 21B).

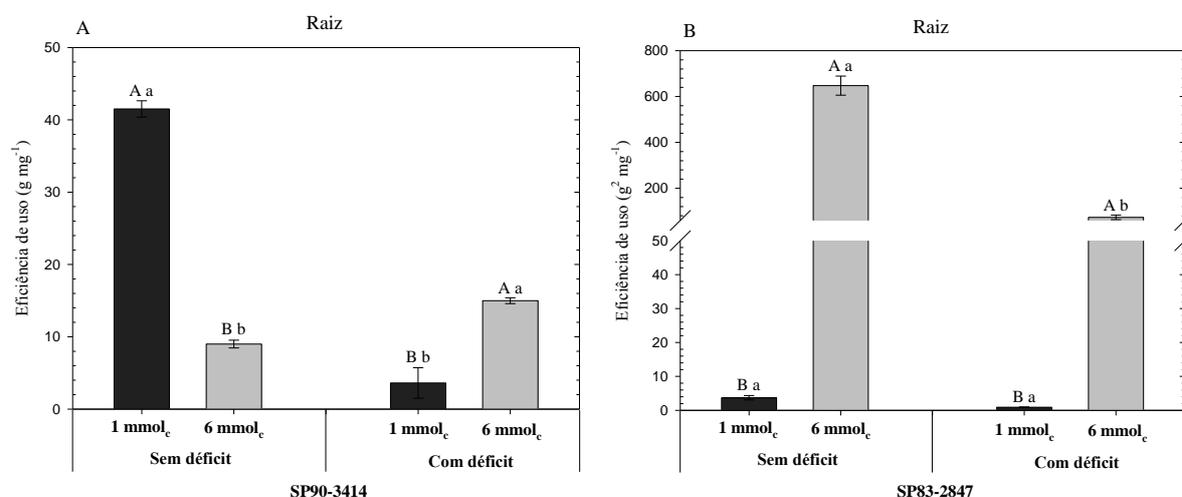


Figura 21 - Eficiência de uso de K (*KUtE*) nas raízes do cultivar suscetível SP90-3414 (A) e tolerante SP83-2847 (B), em função da disponibilidade hídrica e de potássio no substrato. As letras maiúsculas indicam os grupos estatísticos das doses de K (dentro da mesma condição hídrica) e as letras minúsculas indicam os grupos estatísticos da condição hídrica imposta (dentro da mesma dose), a partir do teste de Tukey a 5% de significância.

4.4 Conclusões

Em condição de deficiência hídrica os genótipos SP90-3414 e SP83-2847 apresentam queda de produção, comportamento que pode ser minimizado pelo aumento da disponibilidade de K no solo. O suprimento potássico promove aumento nos valores dos parâmetros morfológicos da parte aérea e raiz, em ambos os cultivares, desenvolvidos em condição de restrição hídrica, sendo, contudo, mais pronunciado no cultivar SP90-3414, diferença relacionada ao melhor desempenho fotossintético desse cultivar em condição de déficit hídrico e alta concentração de K. O genótipo SP83-2847 apresenta-se mais eficiente em condição de restrição hídrica e baixa disponibilidade de K, demonstrando melhores resultados nos parâmetros fisiológicos e morfológicos, fato relacionado a maior capacidade de manutenção hídrica do genótipo SP83-2847 em condição de déficit hídrico.

Referências

- ALI, M.; BAKHT, J.; KHAN, G.D. Effect of water deficiency and potassium application on plant growth, osmolytes and grain yield of *Brassica napus* cultivars. **Acta Botanica Croatia**, Zagreb, v. 73, p. 299-314, 2014.
- ARIAS, M.I.B.; DELGADO, E.O.; CARMENATE, R.V. **Cambios fisiológicos de la caña de azúcar ante el déficit hídrico**. 1. ed. México: Universidad Autónoma Chapingo, 1996. 135 p.
- BAQUE, M.A.; KARIM, M.A.; HAMID, A.; TETSUSHI, H. Effects of fertilizer potassium on growth, yield and nutrient uptake of wheat (*Triticum aestivum*) under water stress conditions. **South Pacific Studies**, Kagoshima, v. 27, p. 25-35, 2006.
- BATTIE-LACLAU, P.; LACLAU, J.P.; DOMEQ, J.C.; CHRISTINA, M.; BOUILLET, J.P.; PICCOLO, M.C.; GONÇALVES, J.L.M.; MOREIRA, R.M.; KRUSCHE, A.V.; BOUVET, J.M.; NOUVELLON, Y. Effects of potassium and sodium supply on drought-adaptive mechanisms in *Eucalyptus grandis* plantations. **New Phytologist**, London, v. 203, p. 401-413, 2014.
- BENLLOCH-GONZALEZ, M.; ARQUERO, O.; FOURNIER, J.M.; BARRANCO, D.; BENLLOCH, M. K^+ starvation inhibits water-stress-induced stomatal closure. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 165, p. 623-630, 2008.
- BELTRAME, J.A. Novas variedades comerciais para a Região Centro Sul. In: SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2., 2005, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ/USP, 2005. p. 13.
- BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; SANTOS, A.O. Potencial da água na folha como um indicador de déficit hídrico em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, p. 1531-1540, 2000.
- BERGONCI, J.I.; PEREIRA, P.G. Comportamento do potencial da água na folha e da condutância estomática do milho em função da fração de água disponível no solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 2, p. 229-235, 2002.
- BRAG, H. The influence of potassium on the transpiration rate and stomatal opening in *Triticum aestivum* and *Pisum sativum*. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 26, p. 250-257, 1972.
- CIA, M.C.; GUIMARÃES, A.C.R.; MEDICI, L.O.; CHABREGAS, S.M.; AZEVEDO, R.A. Antioxidant responses to water deficit by drought-tolerant and -sensitive sugarcane varieties. **Annals of Applied Biology**, Hoboken, v. 161, p. 313-324, 2012.
- DALRI, A.B.; CRUZ, R.L. Produtividade da cana-de-açúcar fertirrigada com N e K via gotejamento subsuperficial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, p. 516-524, 2008.
- DEDEMO, G. C. **Expressão gênica diferencial durante déficit hídrico em duas cultivares de cana-de-açúcar**. 2006. 75 f. Dissertação (Mestrado em Genética em Melhoramento de Plantas) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Jaboticabal, 2006.

DINARDO-MIRANDA, L.L.; DE VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: IAC, 2010. 882 p.

EGILLA, J.N.; DAVIES JUNIOR, F.T.; BOUTTON, T.W. Drought stress influences leaf water content, photosynthesis, and water-use efficiency of *Hibiscus rosa-sinensis* at three potassium concentrations. **Photosynthetica**, Dordrecht, v.43, p. 135-140, 2005.

EGILLA, J.N.; DAVIES JUNIOR, F.T.; DREW, M.C. Effect of potassium on drought resistance of *Hibiscus rosa-sinensis* cv. Leprechaun: Plant growth, leaf macro and micronutrient content and root longevity. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 229, p. 213-224, 2001.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

FANAEI, H.R.; GALAVI, M.; KAFI, M.; BONJAR, A.G. Amelioration of water stress by potassium fertilizer in two oilseed species. **International Journal of Plant Production**, Gorgan, Iran, v. 3, p. 41-54, 2009.

FAGERIA, N.K. Eficiência do uso de potássio pelos genótipos de arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, p. 2115-2120, 2000.

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C.; JONES, C.A. Rice. In: FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C.; JONES, C.A. (Ed.). **Growth and mineral nutrition of field crops**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1997. p. 283-343.

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C.; LI, Y.C. The role of nutrient efficient plants in improving crops yields in the twenty first century. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 31, p. 1121-1157, 2008.

FAO. **High Level Expert Forum**. How to Feed the World in 2050. Rome, 2009. Disponível em: www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/HLEF2050_Global_Agriculture.pdf

FAROOQ, M.; WAHID, A.; KOBAYASHI, N.; FUJITA, D.; BASRA, S.M.A. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. **Agronomy for Sustainable Development**, Heidelberg, v. 29, p. 185-212, 2009.

GE, T.; SUI, F.; BAI, L.; TONG, C.; SUN, N. Effects of water stress on growth, biomass partitioning, and water-use efficiency in summer maize (*Zea mays* L.) throughout the growth cycle. **Acta Physiologiae Plantarum**, Heidelberg, v. 34, p. 1043-1053, 2012.

GEE, G.W.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J.H.; TOOP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 255-293. (Book Series, 5).

GONÇALVES, E. R. **Fotossíntese, osmorregulação e crescimento inicial de quatro variedades de cana-de-açúcar submetida à deficiência hídrica**. 2008. 66 f. Dissertação

(Mestrado em Agronomia/Produção Vegetal) - Universidade Federal do Alagoas, Rio Largo, 2008.

GONÇALVES, E.R.; FERREIRA, V.M.; SILVA, J.V.; ENDRES, L.; BARBOSA, T.P.; DUARTE, W.G. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a* em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, João Pessoa, v. 14, p. 378-386, 2010.

JIANG, M.Y.; ZHANG, J.H. Involvement of plasma-membrane NADPH oxidase in abscisic-acid and water stress-induced antioxidant defense in leaves of maize seedlings. **Planta**, New York, v. 215, p. 1022-1030, 2002.

JORDAN-MEILLE, L.; PELLERIN, S. Shoot and root growth of hydroponic maize (*Zea mays* L.) as influenced by K deficiency. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 304, p. 157-168, 2008.

KING, J.; GAY, A.; SYLVESTER-BRADLEY, R.; BINGHAM, I.; FOULKES, J.; GREGORY, P.; ROBINSON, D. Modelling cereal root systems for water and nitrogen capture: towards an economic optimum. **Annals of Botany**, Oxford, v. 91, p. 383-390, 2003.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. 1. ed. São Carlos: RiMa, 2004. 531 p.

LINDHAUER, M.G. Influence of K nutrition and drought on water relations and growth of sunflower (*Helianthus annuus* L.). **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, Hoboken, v. 148, p.654-669, 1985.

MACHADO, R.S.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, D.F.S.P.; MACHADO, E.C.; LANDELL, M.G.A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 44, p. 1575-1582, 2009.

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

MAQSOOD, M.; SHEHZAD, M.A.; WAHID, A.; BUTT, A.A. Improving drought tolerance in maize (*Zea mays*) with potassium application in furrow irrigation systems. **International Journal of Agriculture and Biology**, Faisalabad, v. 15, p. 1193-1198, 2013.

MARSCHNER, P. (Ed.). **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2012. 615 p.

MASCHIO, R. **Produtividade da água em biomassa e energia para 24 variedades de cana-de-açúcar** 2011. 87 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

MEDICI, L.O.; MACHADO, A.T.; AZEVEDO, R.A.; PIMENTEL, C. Glutamine synthetase activity, relative water content and water potential in maize submitted to drought. **Biologia Plantarum**, Dordrecht, v.47, p.301-304, 2003.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. 5. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 849 p.

MULDER, E.G.; BOXMA, R.; VAN VENN, W.L. The effect of molybdenum and nitrogen deficiencies on nitrate reduction in plant tissue. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 10, p. 335-355, 1959.

NABLE, R.O.; ROBERTSON, M.J.; BERTHELSEN, S. Response of shoot growth and transpiration to soil drying in sugarcane. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 207, p. 59-65, 1999.

NAWAZ, F.; AHMAD, R.; WARAICH, E.A.; NAEEM, M.S.; SHABBIR, R.N. Nutrient uptake, physiological responses, and yield attributes of wheat (*Triticum aestivum* L.) exposed to early and late drought stress. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 35, p. 961-974, 2012.

OLIVEIRA, R.A.; DAROS, E.; ZAMBON, J.L.C.; WEBER, H.; IDO, O.T.; BESPALHOK-FILHO, J.C.; ZUFFELATO-RIBAS, K.C.; DA SILVA, D.K.T. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, p. 71-76, 2007.

PANDEY, R.K.; MARANVILLE, J.W.; CHETIMA, M.M. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment II. Shoot growth, nitrogen uptake and water extraction. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 46, p. 15-27, 2000.

PORTUGAL. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. **Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água, setembro/2001**. Lisboa: MAOT, 2001. 212p.

PRADO, H. do; PÁDUA-JUNIOR, A.L.; GARCIA, J.C.; MORAES, J.F.L. de; CARVALHO, J.P. de; DONZELI, P.L. Solos e ambientes de produção. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: IAC, 2010. p. 179-205.

PREMACHANDRA, G.; SANEOKA, H.; OGATA, S. Cell membrane stability and leaf water relations as affected by potassium nutrition of water-stressed maize. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.42, p. 739-745, 1991.

QUARTACCI, M.F.; SGHERRI, C.L.M.; PINZINO, C.; NAVARIIZZO, F. Superoxide radical production in wheat plants differently sensitive to drought. **Proceedings of the Royal Society of Edinburgh**, Edinburgh, v. 102, p.287-290, 1994.

QUINTERO, J.M.; FOUNIER, J.M.; RAMOS, J.; BENLLOCH, M. K⁺ status and ABA affect both exudation rate and hydraulic conductivity in sunflower roots. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 102, p. 279-284, 1998.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; GUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. 1. ed. Campinas: IAC, 2001. 285 p.

RAMPINO, P.; PATALEO, S.; GERARDI, C.; MITA, G.; PERROTTA, C. Drought stress response in wheat: physiological and molecular analysis of resistant and sensitive genotypes. **Plant, Cell and Environment**, Oxon, v. 29, p. 2143-2152, 2006.

REIS, A.R.; FAVARIN, J.L.; MALAVOLTA, E.; LAVRES JUNIOR, J.; MORAES, M.F. Photosynthesis, Chlorophylls, and SPAD readings in coffee leaves in relation to nitrogen supply. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 40, p. 1512-1528, 2009.

RENGEL, Z.; DAMON, P.M. Crops and genotypes differ in efficiency of potassium uptake and use. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 133, p. 624–636, 2008.

SCANDALIOS, J.G. Oxidative stress: molecular perception and transduction of signals triggering antioxidant gene defenses. **Brazilian Journal of Medical and Biological Research**, Ribeirão Preto, v. 38, p. 995-1014, 2005.

SCOTTI CAMPOS, P.; THU PHAN THI, A. Effects of abscisic acid pretreatment on membrane leakage and lipid composition of *Vigna unguiculata* leaf discs subjected to osmotic stress. **Plant Science**, Amsterdam, v.130, p.11-18, 1997.

SIDDIQI, M.Y.; GLASS, A.D.M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 4, p. 289-302, 1981.

SILVA, M.A.; JIFON, J.L.; Da SILVA, J.A.G.; SHARMA, V. Use of physiological parameters as fast tools to screen for drought tolerance in sugarcane. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 19, p. 193-201, 2007.

SMITH, M.A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 98, p. 91-97, 2006.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT**. User's guide, version 6.11. 4.ed. Cary, NC, 1996. v. 2, 842p.

SATTELMACHER B.; HORST, W.J., BECKER, H.C. Factors that contribute to genetic variation for nutrient efficiency of crop plants. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, Hoboken, v. 157, p. 215-224, 1994.

SUDAMA, S.; TIWARI, T.N.; SRIVASTAVA, R.P.; SINGH, G.P.; SINGH, S. Effect of potassium on stomatal behavior, yield and juice quality of sugarcane under moisture stress condition. **Indian Journal of Plant Physiology**, New Delhi, v. 3, p. 303-305, 1998.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TUNA A.L.; KAYA, C.; ASHRAF, M. Potassium sulfate improves water deficit tolerance in melon plants grown under glasshouse conditions. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 33, p. 1276-1286, 2010.

VALADABADI, S.A.; FARAHANI, H.A. Studying the interactive effect of potassium application and individual field crops on root penetration under drought control. **Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development**, Lesotho, v. 2, p. 82-86, 2010.

WANG, R.Z.; GAO, Q. Photosynthesis, transpiration, and water use efficiency in two divergent *Leymus chinensis* populations from Northeast China. **Photosynthetica**, Dordrecht, v. 39, p. 123-126, 2001.

WHITE, P.J. Improving potassium acquisition and utilisation by crop plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Hoboken, v. 176, p. 305–316, 2013.

XUE, Q.; ZHU, Z.; MUSICK, J.T.; STEWART, B.A.; DUSEK, D.A. Root growth and water uptake in winter wheat under deficit irrigation. **Plant and soil**, Dordrecht, v. 257, p. 151-161, 2003.

ZAIN, N.U.A.; ISMAIL, M.R.; PUTEH, A.; MAHMOOD, M.; ISLAM, M.R. Drought tolerance and ion accumulation of rice following application of additional potassium fertilizer. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 45, p. 2502-2514, 2014.

ZORB, C.; SENBAYRAM, M.; PEITER, E. Potassium in agriculture – Status and perspectives. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 171, p. 656-669, 2014.