

IGOR TENÓRIO MARINHO DA ROCHA

**NUTRIÇÃO, ASPECTOS FISIOLÓGICOS E PRODUTIVIDADE DE
CANA-DE-AÇÚCAR SOB FERTILIZAÇÃO POTÁSSICA**

Recife

2017

Igor Tenório Marinho da Rocha

Engenheiro Agrônomo

**Nutrição, aspectos fisiológicos e produtividade de cana-de-açúcar sob fertilização
potássica**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciências do solo) da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor em agronomia (Ciências do solo).

Orientador: Prof. Dr. Fernando José Freire

Co-orientadores: Prof. Dr. Edivan Rodrigues de Souza

Prof. Dr. Emídio Cantídeo de Oliveira

Recife

2017

Autorizo a reprodução e 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)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Nome da Biblioteca, Recife-PE, Brasil

M188c Rocha, Igor Tenório Marinho da
Nutrição, aspectos fisiológicos e produtividade de cana-de-açúcar sob fertilização potássica / Igor Tenório Marinho da Rocha. – 2017.
156 f. : il.

Orientador: Fernando José Freire.
Coorientadores: Emidio Cantídio de Oliveira Filho, Edivan Rodrigues de Souza.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciências do solo, Recife, BR- PE, 2017.
Inclui referências, apêndice(s) e anexo(s).

1. Saccharum spp. 2. Adubação potássica 3. Estresse oxidativo 4. Cana-de-açúcar I. Freire, Fernando José, orient. II. Oliveira Filho, Emidio Cantídio de, coorient. III. Souza, Edivan Rodrigues de, coorient. IV. Título

CDD 574

IGOR TENÓRIO MARINHO DA ROCHA

Nutrição, aspectos fisiológicos e produtividade de cana-de-açúcar sob fertilização potássica

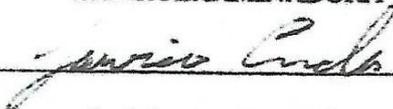
Tese apresentada ao programa de pós-graduação em agronomia (Ciências do solo) da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor em agronomia (Ciências do solo).

Aprovada em 23 de fevereiro de 2017



Prof. Dr. Fernando José Freire
Orientador
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Laurício Endres
Universidade Federal de Alagoas



Prof. Dr. Emídio Cantídio de Oliveira
Universidade Federal Rural de Pernambuco



Dr. Flávio José Rodrigues
Universidade Federal Rural de Pernambuco



Dr. Carlos Henrique de Azevedo Farias
Usina Mirri

O estresse hídrico é terrível às plantas. Quando ocorre falta d'água a planta sofre com sede e com fome ao mesmo tempo.

(Fernando Tenório da Rocha)

Aos meus pais Fernando Tenório da Rocha e
Tânia Mercês Marinho,

Minha esposa Anibia Vicente da Silva,

E meus irmãos Welker, Fernanda, Marina e
Withaynanda

Por todo apoio e carinho.

Dedico e ofereço

AGRADECIMENTOS

A Deus, por permitir a conclusão de mais uma etapa da minha vida.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), pela oportunidade de realização desta qualificação.

Ao prof. Fernando José Freire pela orientação e exemplo profissional.

Aos professores Emídio Cantídeo de Oliveira Filho, Edivan Rodrigues de Souza e Brivaldo Gomes de Almeida por toda orientação e amizade durante o doutorado.

Ao prof. Laurício Endres e a técnica de laboratório Isabella por todo auxílio despendido para realização de análises laboratoriais.

Ao corpo docente do programa de pós-graduação em ciência do solo da UFRPE, por todo aprendizado.

Ao Dr. Djalma Euzébio Simões Neto (EECAC/UFRPE) e aos engenheiros Agrônomos Silas (Destilaria Tabu) e Evanilson (EECAC/UFRPE) pelo apoio e fornecimento das condições necessárias para o desenvolvimento das pesquisas.

Aos amigos Danillo Barbosa, Danilo Cavalcante, Vitor Fleming, Flávio Pereira e Remy Farias os quais compartilhei grandes momentos de felicidade durante toda caminhada do doutorado.

Aos técnicos do programa de solos/UFRPE Socorro, Josué e Zeca por todo apoio.

Aos graduandos do curso de agronomia Elton e Amanda e ao mestrando Augusto (UFRPE).

A todos que contribuíram direta e indiretamente para a conclusão deste trabalho de tese, meus sinceros agradecimentos.

NUTRIÇÃO, ASPECTOS FISIOLÓGICOS E PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB FERTILIZAÇÃO POTÁSSICA

RESUMO GERAL

O estudo avaliou o efeito da adubação potássica sobre a nutrição, aspectos fisiológicos e produtividade da cana-de-açúcar. Foram realizados três experimentos, dois em campo e um em casa de vegetação. Os experimentos em campo foram instalados na Estação experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC) e na destilaria Tabu. Foi avaliado o efeito de seis doses de K_2O (0, 25, 50, 100, 200 e 250 $kg\ ha^{-1}$) em duas variedades de cana (RB92579 e RB962962) na EECAC, e em uma variedade (RB992506) na Tabu. O delineamento foi em blocos ao acaso com quatro repetições. Foram avaliados o estado nutricional (N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Mn e Fe), as características fisiológicas (condutância estomática, transpiração, fotossíntese líquida e concentração interna de CO_2) e a produtividade ($t\ ha^{-1}$) em ambos os campos experimentais. Na Tabu também foi avaliado os teores e níveis críticos de K no solo e na folha, o teor de açúcares totais recuperáveis (ATR) na cana e as características fisiológicas (catalase (CAT), superóxido dismutase (SOD), arcorbato peroxidase (APX), prolina, proteína, açúcares solúveis, clorofila A, B, Total, A/B e carotenóides) na fase de maturação (9 meses). O experimento em casa de vegetação avaliou o efeito de cinco concentrações de K (0; 0,5; 1,0; 2,0 e 6,0 $mmol\ L^{-1}$) adubadas com solução nutritiva em duas variedades de cana (RB92579 e RB992506). O experimento foi montado em blocos ao acaso em esquema fatorial (2x5) com quatro repetições. Avaliaram-se os aspectos fisiológicos (CAT, SOD, APX, prolina, proteína, açúcares solúveis, clorofila A, B, Total, A/B e carotenóides) e produção de massa seca. Todos os dados foram submetidos à análise de variância, e regressão para os dados quantitativos. Em campo, as doses de K_2O aplicadas promoveram efeito significativo somente para no experimento instalado na destilaria Tabu. Observou-se elevação dos teores foliares de K, S, condutância estomática e transpiração e decréscimo do teor de Mg na cana. Observou-se, também, efeito quadrático das doses de K_2O sobre a produtividade da cana, sendo o aumento da produtividade observado até a dose de 150 $kg\ ha^{-1}$, e aumento linear do teor de açúcares totais. A dose de máxima eficiência agrônômica foi de 150 $kg\ ha^{-1}$ de K_2O e a produtividade de máxima eficiência agrônômica foi de 116 $t\ ha^{-1}$. Os níveis críticos no solo e folha foram 0,18 $cmol_c\ dm^{-3}$ e 9,53 $g\ kg^{-1}$, respectivamente. A aplicação das doses de K_2O promoveu aumento nos teores de prolina e dos pigmentos foliares clorofila a, b, total e carotenóides até a dose de 150 $kg\ ha^{-1}$ na fase de maturação. No experimento de casa de vegetação, as doses de K^+ aplicadas em solução nutritiva causaram diminuição da atividade das enzimas SOD e CAT e aumento do teor de proteínas na cana. Observou-se maior atividade das enzimas CAT e APX na variedade RB92579 do que na RB992506. No entanto, os teores de pigmentos foliares foram maiores na variedade RB992506. As doses de K^+ proporcionaram aumento quadrático da massa seca da cana, sendo observada maior produção de massa seca pela variedade RB992506.

Palavras chave: Trocas gasosas. Nível crítico de potássio no solo e na planta.

NUTRITION, PHYSIOLOGICAL ASPECTS AND PRODUCTIVITY OF SUGARCANE BY POTASSIC FERTILIZATION

ABSTRACT

The study evaluated the effect of potassium fertilization on nutrition, physiological aspects and productivity of sugarcane. Three experiments were performed, two in field and one in a greenhouse. Field experiments were performed at the Carpina Sugarcane Experimental Station (EECAC) and the Tabu distillery. The effect of six rates of K_2O (0, 25, 50, 100, 200 and 250 $kg\ ha^{-1}$) on two sugarcane varieties (RB92579 and RB962962) on EECAC and in one variety (RB992506) on Tabu were evaluated. The experimental design was in randomized blocks with four replications. Were evaluated the nutritional status (N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Mn and Fe), physiological characteristics (stomatal conductance, transpiration, liquid photosynthesis and internal CO_2 concentration) in both experimental fields. In Tabu was also evaluated the concentration and critical levels of K in the soil and leaf, the content of total recoverable sugars (TRS) on the cane and physiological characteristics (catalase (CAT), superoxide dismutase (SOD), ascorbate peroxidase (APX), Proline, protein, soluble sugars, chlorophyll A, B, Total, A/B and carotenoids) in the maturation phase (9 months). In the greenhouse experiment were evaluated the effect of five concentrations of K (0, 0.5, 1.0, 2.0 and 6.0 $mmol\ L^{-1}$) in nutrient solution in two sugarcane varieties (RB92579 and RB992506). The experiment was carried out in randomized blocks in a factorial scheme (2x5) with four replications. The physiological aspects (CAT, SOD, APX, proline, protein, soluble sugars, chlorophyll A, B, Total, A/B and carotenoids) and dry mass production were evaluated. Analysis of variance and regression, for the quantitative data, were performed for all data. In the field, the rates of K_2O applied promoted significant effect only for the experiment performed in the Tabu distillery. It was observed rise of foliar concentration of K, S, stomatal conductance and transpiration and decrease of Mg concentration in sugarcane leaves. It was also observed a quadratic effect of the K_2O rates on sugarcane yield, with the increase in productivity observed up to 150 $kg\ ha^{-1}$, and a linear increase in total sugars. The maximum agronomic efficiency rate was 150 $kg\ ha^{-1}$ of K_2O and the productivity of maximum agronomic efficiency was 116 $t\ ha^{-1}$. Critical levels in soil and leaf were 0.18 $cmol_c\ dm^{-3}$ and 9.53 $g\ kg^{-1}$, respectively. The application of K_2O rates increased the levels of proline and the leaf pigments (chlorophyll a, b, total and carotenoids) up to the rate of 150 $kg\ ha^{-1}$ in the maturation stage. In the greenhouse experiment, the rates of K^+ applied in nutrient solution caused decrease in SOD and CAT enzyme activity and increase of cane protein content. Greater CAT and APX enzyme activity of was observed in the variety RB92579 than in RB992506. However, leaf pigment contents were higher in RB992506 variety. The K^+ rates promoted a quadratic increase in sugarcane dry mass, with higher dry mass production observed in the RB992506 variety.

Keywords: Gas exchange. Potassium critical level in soil and plant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Elementos envolvidos nas respostas a baixa concentração de K^+ nas células radiculares.....	28
Figura 2. Pluviometria do período de junho de 2004 a dezembro de 2005, no município de Sirinhaém, litoral sul de Pernambuco (Rocha et al., 2008).....	37
Figura 3. Balanço hídrico decendial da cultura, destaque para o déficit (DEF) e excesso (EXC) hídrico em cultivo de cana de açúcar (cana-planta, soca e ressoca) na região dos tabuleiros costeiros do estado de Alagoas no período de setembro de 2005 a novembro de 2008 (Abreu et al., 2013).....	38
Figura 4. Representação esquemática da produção de radicais superóxidos em cloroplastos de folhas deficientes em K^+ () refere-se a inibição da reação pela deficiência de K^+ (Cakmak, 2005).....	43

CAPÍTULO 1

Figura 1. Precipitação pluviométrica durante os experimentos nos ambientes A e B.....	64
Figura 2. Teor de nitrogênio em folhas de cana-de-açúcar nas variedades RB92579 e RB962962 em função da aplicação de potássio no ambiente A de produção.....	71
Figura 3. Teor de potássio (A), magnésio (B) e enxofre (C) em folhas de cana-de-açúcar e produtividade agrícola (D) na variedade RB992506 em função da aplicação de potássio no ambiente B de produção.....	73
Figura 4. Concentração de CO_2 intracelular (C_i) em folhas de cana-de-açúcar nas variedades RB92579 e RB962962 em função da aplicação de potássio no ambiente A de produção.....	76
Figura 5. Condutância estomática (gs) (A) e transpiração (E) (B) em folhas de cana-de-açúcar na variedade RB992506 em função da aplicação de potássio no ambiente B de produção.....	78

CAPÍTULO 2

Figura 1. Precipitação pluviométrica durante o experimento.....	91
Figura 2. Teor de potássio trocável no solo em diferentes profundidades (A) e teor de potássio em folha de cana-de-açúcar (B) em função do potássio aplicado no solo.....	96
Figura 3. Produtividade agrícola (A) e ATR (B) de cana-de-açúcar em função do potássio aplicado no solo.....	98
Figura 4. Condutividade elétrica da solução do solo cultivado com cana-de-açúcar em diferentes profundidades em função do potássio aplicado no solo.....	102

Figura 5. Níveis críticos de K trocável no solo, na planta e produção de máxima eficiência agronômica e econômica da cana-de-açúcar.....104

CAPÍTULO 3

Figura 1. Precipitação pluviométrica durante o experimento.....115

Figura 2. Teor de prolina em plantas de cana-de-açúcar em função do potássio aplicado no solo.....121

Figura 3. Teor de clorofila A (A), clorofila B (B), clorofila total (C) e carotenoides (D) em plantas de cana-de-açúcar em função do potássio aplicado no solo.....122

CAPÍTULO 4

Figura 1. Teor de proteína em folha índice de plantas de cana-de-açúcar em função de quantidades crescentes de K aplicado na solução nutritiva (A) e teor de carboidrato na mesma folha de diferentes variedades de cana-de-açúcar (B).....141

Figura 2. Produção de matéria seca de plantas de cana-de-açúcar em função de quantidades crescentes de K aplicado na solução nutritiva (A) e em diferentes variedades de cana-de-açúcar (B).....142

Figura 3. Teor foliar de clorofila A (A), clorofila B (B), clorofila A/B (C), clorofila total (D) e carotenóides (E) em diferentes variedades de cana-de-açúcar e teor foliar de clorofila A/B em função de quantidades crescentes de K aplicado na solução nutritiva (F).....145

Figura 4. Atividade de superóxido dismutase (A) e catalase (B) em função de quantidades crescentes de K aplicado na solução nutritiva e teor de catalase (C) e ascorbatoperoxidase (D) em diferentes variedades de cana-de-açúcar.....147

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Faixas adequadas de nutrientes para a cana-de-açúcar47

CAPÍTULO 1

Tabela 1. Caracterização química e física do solo nos diferentes ambientes dos ensaios de campo.....63

Tabela 2. Teores foliares dos nutrientes nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre em função da aplicação de quantidades crescentes de potássio em diferentes variedades de cana-de-açúcar aos nove meses após o plantio no ambiente A de produção, teores de referência, análise da variância, regressão, média e coeficiente de variação dos dados.....68

Tabela 3. Teor foliar dos nutrientes manganês, zinco, cobre, ferro e produtividade agrícola em função da aplicação de quantidades crescentes de potássio em diferentes variedades de cana-de-açúcar aos nove meses após o plantio no ambiente A de produção, teores de referência, análise da variância, regressão, média e coeficiente de variação dos dados.....69

Tabela 4. Teores foliares dos nutrientes nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, manganês, zinco, cobre, ferro e produtividade agrícola em função da aplicação de quantidades crescentes de potássio na variedade RB992506 de cana-de-açúcar aos quatro meses após o plantio no ambiente B de produção, teores de referência, análise da variância, regressão, média e coeficiente de variação dos dados.....71

Tabela 5. Fotossíntese líquida, condutância estomática, transpiração e concentração de CO₂ intracelular em função da aplicação de quantidades crescentes de potássio em diferentes variedades de cana-de-açúcar aos sete meses após o plantio no ambiente A de produção, análise da variância, regressão, média e coeficiente de variação dos dados.....74

Tabela 6. Fotossíntese líquida, condutância estomática, transpiração e concentração de CO₂ intracelular em função da aplicação de quantidades crescentes de potássio na variedade RB992506 de cana-de-açúcar um mês após o plantio no ambiente B de produção, análise da regressão, média e coeficiente de variação dos dados.....76

CAPÍTULO 2

Tabela 1. Caracterização química e física do solo.....89

Tabela 2. Teor de potássio trocável no solo em diferentes profundidades e teor de potássio em folha de cana-de-açúcar em função do potássio aplicado no solo, análise de regressão e coeficientes de variação dos dados.....94

Tabela 3. Produtividade agrícola e industrial de cana-de-açúcar em função do potássio aplicado no solo, análise de regressão e coeficientes de variação dos dados.....	96
Tabela 4. Condutividade elétrica da solução do solo cultivado com cana-de-açúcar em diferentes profundidades em função do potássio aplicado no solo, análise de regressão e coeficientes de variação dos dados.....	100

CAPÍTULO 3

Tabela 1. Caracterização química e física do solo do ensaio de campo.....	114
Tabela 2. Açúcares solúveis (carboidratos) e proteínas em folha índice de plantas de cana-de-açúcar em função do potássio aplicado no solo, análise de regressão e coeficientes de variação dos dados.....	119
Tabela 3. Aminoácidos (Prolina) e pigmentos foliares em folha índice de plantas de cana-de-açúcar em função do potássio aplicado no solo, análise de regressão e coeficientes de variação dos dados.....	120
Tabela 4. Enzimas do complexo oxidativo em folha índice de plantas de cana-de-açúcar em função do potássio aplicado no solo, análise de regressão e coeficientes de variação dos dados.....	124

CAPÍTULO 4

Tabela 1. Caracterização química do solo utilizado no ensaio.....	136
Tabela 2. Teor de proteína, carboidrato, prolina na folha índice e produção de matéria seca em função de concentrações crescentes de potássio em solução nutritiva em diferentes variedades de cana-de-açúcar em plantas hidratadas e não hidratadas, análise da variância e da regressão, médias e coeficiente de variação dos dados.....	140
Tabela 3. Teor dos pigmentos foliares em função de concentrações crescentes de potássio em solução nutritiva em diferentes variedades de cana-de-açúcar em plantas hidratadas e não hidratadas, análise da variância e da regressão, médias e coeficiente de variação dos dados.....	144
Tabela 4. Teor de enzimas do complexo oxidativo na folha índice em função de concentrações crescentes de potássio em solução nutritiva em diferentes variedades de cana-de-açúcar em plantas hidratadas e não hidratadas, análise da variância e da regressão, médias e coeficiente de variação dos dados.....	146

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	21
1.1.Hipóteses.....	22
1.2.Objetivo geral.....	22
1.3.Objetivos específicos.....	22
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1.Cana-de-açúcar (<i>Saccharum</i> spp.): Início do cultivo no Brasil e classificação botânica.....	23
2.2.Importância econômica.....	23
2.3.Potássio (K): disponibilidade no solo e absorção pela planta.....	24
2.4.Nível crítico de K ⁺ no solo e variedades de cana: Implicações para a recomendação de adubação.....	28
2.5.Produtividade e Qualidade Agrotecnológica da cana sob manejo da adubação potássica.....	30
2.6.Atuação fisiológica do K ⁺ nas plantas.....	32
2.7.Papel do K ⁺ na promoção de tolerância ao déficit hídrico em plantas.....	36
2.8.Espécies reativas de oxigênio (EROs), sua produção e eliminação.....	41
2.9.Avaliação do estado nutricional da cana.....	44
Referências Bibliográficas.....	46
3.CAPÍTULO I: NUTRIÇÃO, FISIOLOGIA E PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA DA CANA-DE-AÇÚCAR FERTILIZADA COM POTÁSSIO EM DIFERENTES AMBIENTES DE PRODUÇÃO.....	57
Resumo.....	58
Abstract.....	59
3.1.Introdução.....	60
3.2.Material e métodos.....	61
3.3.Resultados e discussão.....	67
3.4.Conclusões.....	78

Referências bibliográficas.....	78
4.CAPÍTULO II: NÍVEL CRÍTICO DE POTÁSSIO EM CANA-DE-AÇÚCAR.....	83
Resumo.....	84
Abstract.....	85
4.1.Introdução.....	86
4.2.Material e métodos.....	88
4.3.Resultados e Discussão.....	93
4.4.Conclusões.....	104
Referências bibliográficas.....	105
5.CAPÍTULO III: BIOQUÍMICA DA CANA-DE-AÇÚCAR EM FASE DE MATURAÇÃO FERTILIZADA COM POTÁSSIO.....	109
Resumo.....	110
Abstract.....	111
5.1.Introdução.....	112
5.2.Material e Métodos.....	113
5.3.Resultados e discussão.....	118
5.4.Conclusão.....	125
Referencias bibliográficas.....	125
6.CAPÍTULO IV: BIOQUÍMICA DA CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA SOB DEFICIT HÍDRICO E EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE POTÁSSIO.....	131
Resumo.....	132
Abstract.....	133
6.1.Introdução.....	134
6.2.Material e métodos.....	135
6.3.Resultados e discussão.....	139
6.4.Conclusões.....	148
Referências Bibliográficas.....	149
7.CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	153

1 INTRODUÇÃO GERAL

A disponibilidade hídrica e de nutrientes são importantes fatores responsáveis pela produtividade das culturas. O adequado fornecimento desses fatores permite que o máximo potencial produtivo seja alcançado.

O suprimento adequado dos nutrientes e da água é realizado por meio da adubação e por irrigação, respectivamente, quando as condições de solo e clima não são ótimas. No Estado de Pernambuco, estudos já comprovaram as necessidades nutricionais de fósforo e nitrogênio em cana-de-açúcar (COSTA, 2012; OLIVEIRA, 2012), bem como o efeito do adequado suprimento hídrico na produtividade da cana (OLIVEIRA et al., 2010). No entanto, trabalhos com potássio (K^+), o nutriente exigido em maior quantidade, ainda não foram realizados, sendo evidência dessa necessidade.

A manutenção do bom funcionamento dos processos biofísicos e bioquímicos ligados ao K^+ , além de outros fatores, garante alta produtividade das culturas. O papel biofísico está relacionado ao turgor celular, necessário para a expansão das células, e sobre a abertura e fechamento dos estômatos, ou seja, regulação das trocas gasosas. Já o papel bioquímico está relacionado com a ativação de mais de 40 complexos enzimáticos ligados ao metabolismo de carboidratos e proteínas e no transporte de fotossintatos. Ademais, seu suprimento adequado, ou até mesmo de luxo, promove maior tolerância a estresses abióticos tais como hídrico, salino e de temperatura.

Os solos do Estado de Pernambuco, em geral, são reconhecidos como pobres em nutrientes (Latosolos e Argissolos). Por esse motivo, a adubação potássica é imprescindível. A necessidade nutricional da cana é dependente da variedade (OLIVEIRA et al., 2010), no entanto, as doses de K^+ recomendadas pelo Manual de adubação do Estado de Pernambuco (IPA, 2008) é a mesma tanto para a variedade quanto para o tipo de solo. Por exemplo, em estudo sobre a adubação potássica em seis variedades de cana, observou-se que a dose de máxima eficiência econômica variou de 94 a 165 kg ha⁻¹ de K_2O (UCHÔA et al., 2009). Além disso, as variedades em que as recomendações foram feitas já foram quase todas substituídas por cultivares mais produtivas.

Ademais, a precipitação pluviométrica, principal meio de fornecimento de água para a agricultura canavieira no Estado, é errática e concentrasse principalmente nos meses de março a agosto. O que ocasiona restrição hídrica e perda de produtividade da cana. Por isso, teores

adequados de K^+ na planta são fundamentais, visto esse nutriente promover tolerância à restrição hídrica.

1.1. Hipóteses

A recomendação de adubação potássica para as novas variedades de cana subestima suas necessidades nutricionais.

A adubação potássica promove aumento da produtividade da cana ao melhorar as características fisiológicas (aumento da condutância estomática e transpiração) e bioquímicas (redução da atividade de enzimas do complexo antioxidativo e aumento de pigmentos foliares).

1.2. Objetivo geral

O objetivo deste trabalho foi avaliar as respostas nutricionais, os aspectos fisiológicos e a produtividade da cana-de-açúcar cultivada em campo em plantio de sequeiro e em casa de vegetação.

1.3. Objetivos específicos

- Avaliar o efeito da aplicação de doses de K_2O sobre os teores de K foliar e sobre o estado nutricional da cana-de-açúcar;
- Avaliar o efeito da aplicação de doses de K_2O sobre a produtividade da cana-de-açúcar;
- Avaliar o nível crítico de K no solo e folha para a cana-de-açúcar em solo arenoso em cultivo de sequeiro;
- Determinar o efeito de doses de K_2O sobre a atividade de enzimas responsáveis pela proteção antioxidativa da cana-de-açúcar na fase de maturação e aos dois meses após plantio em casa de vegetação;
- Avaliar o efeito de doses de K_2O sobre os teores foliares de proteínas, carboidratos, prolina e pigmentos foliares na cana-de-açúcar em fase de maturação e aos dois meses após plantio em casa de vegetação.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.): Início do cultivo no Brasil e classificação botânica

A origem da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) remete a Nova Guiné a qual consta ser conhecida desde 8.000 anos a.C., sendo posteriormente difundida para o sul da Ásia (China e Índia) (LUCCHESI, 2001; MOZAMBANI et al., 2006). A sua introdução no Brasil ainda é um ponto discutível. Segundo Lucchesi (2001), em meados do século XVI na Capitania de São Vicente, atualmente o Estado de São Paulo, foi onde ocorreu o primeiro plantio de cana no Brasil, sendo Martim Afonso de Souza o responsável pela implantação dessa cultura. Contrariamente, Mozambani et al. (2006) afirmam que as plantações e engenhos estavam situadas nos Estados de Pernambuco e Bahia, sendo posteriormente introduzida no planalto paulista a partir do ano de 1615. Os autores acima ainda afirmam haver indícios que a cana existia no Brasil anteriormente ao seu descobrimento, contudo o desenvolvimento dessa cultura só se deu com as mudas trazidas pelos portugueses.

A cana-de-açúcar tem a seguinte classificação botânica: Divisão: Magnoliophyta; Classe: Liliopsida; Sub-classe: Comelinidae; Ordem: Cyperales; Família: Poaceae; Tribo: Andropogonae, Subtribo: Saccharininae, Gênero: *Saccharum* e Espécies: *Saccharum officinarum*, *S. spontaneum*, *S. sinensis*, *S. barberi* e *S. robustum* (LUCCHESI, 2001; MOZAMBANI et al., 2006). As variedades utilizadas comercialmente são originadas do cruzamento entre espécies e, ou variedades.

Morfologicamente, a cana-de-açúcar apresenta raízes fasciculadas podendo, ainda, as raízes serem classificadas como raízes superficiais, fixação ou suporte e cordões. A cana-de-açúcar possui colmo cilíndrico, ereto, fibroso e rico em açúcares. O colmo é constituído de nós e entrenós. Em cada nó é encontrado uma gema. As folhas são divididas basicamente em limbo foliar e bainha, sendo que a bainha corresponde a um pecíolo modificado. O formato da lâmina foliar é lanceolado, em ambas as faces são encontradas estômatos, contudo, a face abaxial possui maior concentração. As folhas se dispõem em simetria alternada e oposta, sendo encontrada somente uma folha em cada nó. A inflorescência da cana-de-açúcar é

denominada panícula. Sua flor é hermafrodita, sendo encontrado um óvulo por ovário. A semente é um fruto do tipo cariopse (LUCCHESI, 2001; MOZAMBANI et al., 2006).

2.2. Importância econômica

A cana-de-açúcar é uma importante cultura agrícola para o Brasil, bem como para o Estado de Pernambuco, sendo o Brasil o maior produtor mundial de cana (MAPA, 2017).

O grande impulso para o cultivo da cana de açúcar no Brasil, bem como toda a tecnologia de produção envolvida, foi oriunda de esforços para o melhoramento genético e manejo cultural (adubação e controle de pragas e doenças) realizado pelo Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL), que foi criado na década de 70 por incentivo do governo federal a fim de diminuir a dependência nacional de importação de petróleo devido à grande crise no fornecimento e a elevação dos preços dessa matéria prima (CORTEZ, 2016).

Apesar de o petróleo ter retornado a valores economicamente viáveis e o Brasil ter se tornando um dos maiores produtores dessa matéria prima, especialmente na exploração das reservas marítimas do pré-sal (PETROBRAS, 2017), a busca por fontes renováveis de energia e ambientalmente amigas ainda torna a cana-de-açúcar uma importante fonte de matéria prima para produção de energia (RAGAUSKAS et al., 2006).

No biênio 2015/2016 estimou-se área cultivada com cana-de-açúcar no país de, aproximadamente, 9.110,9 mil hectares, sendo previsto um total de 694.544,8 mil toneladas de cana-de-açúcar a serem moídas neste biênio. Pernambuco é o segundo Estado com maior produção de cana-de-açúcar no Nordeste, ficando atrás, do Estado das Alagoas. Para 2016, a área cultivada no Estado de Pernambuco está estimada em 251,1 mil hectares, com produção total de 13.370,1 mil toneladas de cana-de-açúcar, 1.110,9 mil toneladas de açúcar e 356.396,9 mil litros de álcool (CONAB, 2016).

A despeito da grande área cultivada no Brasil, bem como no Estado de Pernambuco, a produtividade média por hectare da cana-de-açúcar está muito abaixo do seu potencial. No Estado de Pernambuco, a média de produtividade está em torno de 45 t ha⁻¹(CONAB, 2016). Diversos fatores contribuem para esta realidade, dentre eles, o baixo investimento no manejo (preparo do solo, adubação, correção da acidez do solo, irrigação) e a utilização de cultivares de elevada produtividade, mas com baixa tolerância às condições adversas como seca e solos ácidos.

2.3. Potássio (K): disponibilidade no solo e absorção pela planta

O potássio foi identificado por Sir Humphrey Davy a partir da potassa cáustica em 1807, tendo recebido a denominação de “potash”. Essa denominação foi atribuída devida este elemento ter sido obtido a partir da lixiviação de cinzas de árvores com evaporação do lixiviado em potes de ferro. Os resíduos encontrados no fundo dos potes eram denominados de “potash”, ou cinzas de pote. O potássio possui símbolo “K” tem número atômico 19, peso atômico aproximado 39, e configuração eletrônica nas camadas (2 8 8 1) (NASCIMENTO; LAPIDO-LOUREIRO, 2009).

A cana-de-açúcar apresenta elevada exigência nutricional pelo K^+ , maior, até, do que as dos nutrientes N e P. As quantidades extraídas são diferentes de acordo com a variedade, a qual pode chegar a 400 kg ha^{-1} (OLIVEIRA et al., 2010; SCHULTZ et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2011), sendo que sua maior demanda e concentração na folha ocorre na fase inicial do crescimento com posterior diminuição dos teores à medida que a planta cresce (MEDINA et al., 2013).

No solo, o K^+ pode estar presente sob quatro formas: 1 – Estrutural: fazendo parte de minerais primários; 2 – Trocável: retido nos sítios com cargas negativas dos minerais da fração argila; 3 – Não-trocável: adsorvidos fortemente em minerais tipo 2:1, e 4 – Solução: K^+ presente na solução do solo (MIELNICZUK, 1977; MELO et al., 2003; MEDEIROS et al., 2014).

Dentre as formas acima citadas, o K^+ em solução é a forma absorvida pela planta. À medida que esta fração seja exaurida, a fração trocável é liberada a fim de atingir um novo equilíbrio. Não obstante, as formas não-trocável e estrutural, mesmo que em menor valor, possuem participação na nutrição potássica das plantas (SILVA et al., 2000; MELO et al., 2003; ERNANI et al., 2007; ALVES et al., 2013).

A disponibilidade natural de K^+ no solo é, basicamente, função do material de origem em que o solo se formou e seu grau de desenvolvimento (MELO et al., 2003; MEDEIROS et al., 2014). Mesmo um solo muito argiloso como o Nitossolo pode apresentar menor teor de K^+ total do que um solo com menor teor de argila, como o Argissolo (MELO et al., 2003). De forma geral, solos formados de material de origem com grande quantidade de minerais primários ricos em K, tais como rochas metamórficas (xistos, migmatitos e gnaisses), magmáticas intrusivas (granitos e granitoides) e em sedimentares pelíticas (siltitos, argilitos e folhelhos) condicionam solos com elevado teor de K (ERNANI et al., 2007).

O K^+ aplicado de fertilizantes também modifica as formas, quantidades e disponibilidade do K^+ , especialmente, devido à mineralogia do solo. Solos jovens com presença de minerais expansíveis (2:1) possuem grande capacidade de retenção do K^+ , e, com isso, há diminuição da disponibilidade do nutriente em curto prazo (MEDEIROS et al., 2014). Este fato é devido à fixação do K^+ nos pólos ditrigonais nos espaços entre-camadas desses minerais. Devido sua baixa energia de hidratação e as cargas negativas do mineral, a força de ligação entre mineral e o K^+ excede sua força de hidratação, o que ocasiona a desidratação do íon e, em seguida, o colapso da estrutura do mineral (MELO et al., 2003).

Já em solos com maior presença de minerais do tipo 1:1, como a caulinita, não ocorre fixação do K^+ em formas menos disponíveis, ou seja, todo o potássio aplicado ao solo permanece na forma trocável ou em solução (MEDEIROS et al., 2014).

Mesmo assim, as culturas agrícolas, para seu crescimento, dependem do potássio recém aplicado ao solo. Sendo que o histórico de adubação potássica ou os teores de K em formas pouco disponíveis não são suficientes para sustentar suas necessidades nutricionais (KAMINSKI et al., 2007).

O potássio é absorvido na forma iônica pelas plantas (NIEVES-CORDONES et al., 2014). A absorção do K^+ do solo pela planta ocorre, principalmente, pelo transporte difusivo, contudo, pequena parte pode ser absorvida via fluxo de massa (ROSOLEM et al., 2003).

O sistema de transporte de K^+ é realizado por dois tipos de componentes, um de baixa afinidade, os canais, e um de alta afinidade, os transportadores (ASHLEY et al., 2006).

Quando na solução do solo, o K^+ é absorvido por meio de um complexo sistema de transporte presente na membrana plasmática das células epidérmicas e corticais das raízes. De acordo com as concentrações de K^+ na solução, as plantas podem ativar diferentes sistemas de aquisição desse nutriente. Para a *Arabidopsis thaliana*, espécie modelo, são descritos 3 principais sistemas de aquisição de K^+ que podem atuar sobre 4 concentrações: 1 – Altas concentrações (> 10 mM): Canais não seletivos – consiste no principal meio de absorção de K^+ ; 2 – Concentrações intermediárias (1 mM): Canais de influxo retificadores “inwardward” AKT1 – são os principais atuantes; 3 – Baixas concentrações (100 μ M): sob essa condição os canais AKT1, e o canal de alta afinidade pelo K^+ , HAK5, são responsáveis pela absorção, e 4 – Concentrações extremamente baixas (< 10 μ M): o único sistema capaz de absorção de K^+ é o HAK5 (NIEVES-CORDONES et al., 2014).

Além dos transportadores, o contraíon que acompanha o K^+ também promove efeito sobre sua absorção e transporte. Em comparação com o SO_4^{2-} , o NO_3^- e o $H_2PO_4^-$, o Cl^- possibilita taxa de transporte 60% maior (BRITTO; KRONZUCKER, 2008).

A percepção da deficiência de K^+ , bem como a indução metabólica para sua aquisição, é promovida por um conjunto de sinalizações celulares, tais como hiperpolarização do potencial da membrana celular, produção de EROs, sinais de Ca^{2+} , produção de hormônios como etileno, ácido jasmonico e citocinina, e a própria percepção da concentração de K^+ pelos canais de K^+ (ASHLEY et al., 2006; BRITTO; KRONZUCKER, 2008; NIEVES-CORDONES et al., 2014).

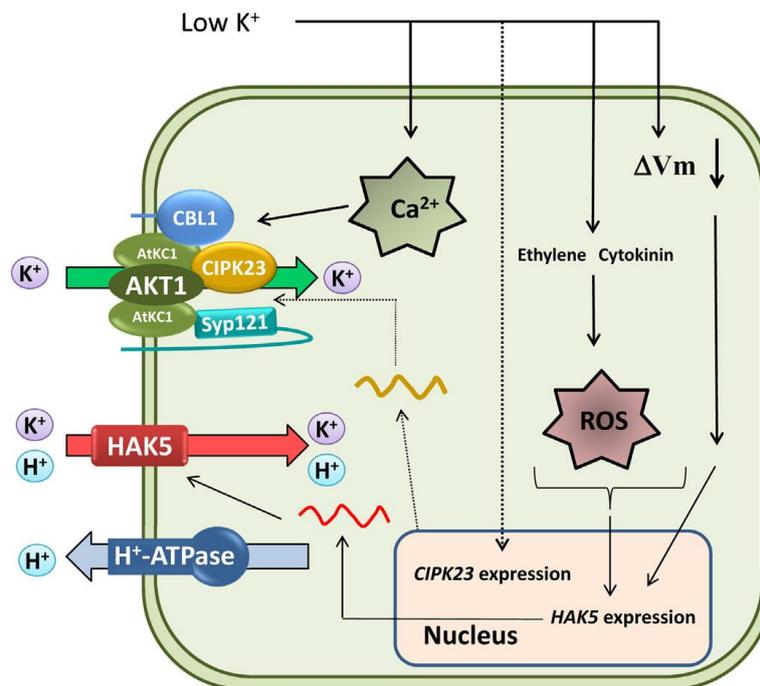


Figura 1. Elementos envolvidos nas respostas a baixa concentração de K^+ nas células radiculares

A hiperpolarização dos potenciais de membrana e acumulação de EROs estão entre os primeiros mecanismos de percepção da deficiência de K^+ pelas células radiculares. A acumulação de EROS também sinaliza a deficiência de NO_3^- , Pi e SO_4^{2-} . A hiperpolarização promove a transcrição de genes responsáveis pela codificação dos transportadores de alta afinidade pelo K^+ (HAK5). A expressão do gene atHAK5 também é função da acumulação de EROs, e plantas com deficiência de K^+ acumulam rapidamente esses oxidantes celulares. Após o aumento inicial das concentrações de EROs para ativação dos canais de absorção de K^+ de alta afinidade, a planta promove o aumento da atividade das enzimas do complexo antioxidativo (SOD, APX e CAT), que são responsáveis pela detoxificação desses radicais

que, quando presentes por tempo prolongado e em concentrações elevadas, promovem a oxidação das organelas celulares (NIEVES-CORDONES et al., 2014).

2.4. Nível crítico de K⁺ no solo e variedades de cana: Implicações para a recomendação de adubação

A recomendação das doses de fertilizantes potássicos aplicados para a cana no Estado de Pernambuco é em relação ao teor presente no solo e a produtividade desejada. Além disso, as doses recomendadas para adubação potássica foram calibradas para poucas variedades (RB72454, SP791011, SP701143, SP716949 e SP784764) (IPA, 2008), e de grande importância, elas já foram substituídas por cultivares mais tolerantes e produtivas para a região, somente a variedade SP791011 ainda é cultivada no Nordeste (ROCHA et al., 2014).

Características como teor de argila e qualquer outra a ela correlacionada, como poder tampão, CTC e poder tampão de K (ERNANI et al., 2007; WIETHOLTER, 2007), e a própria variedade a ser cultivada (DOBERMANN, 2001; ERNANI et al., 2007), influenciam nas calibrações das recomendações de adubação potássica e, assim, nas quantidades de fertilizantes a serem aplicados e seus níveis críticos. Portanto, sendo necessária a incorporação desses parâmetros nos quadros de recomendação.

Nos Estados Unidos da América (EUA), por décadas, a adubação era realizada com excedente de nutrientes, ou seja, a quantidade de fertilizante aplicada ao solo era superior ao exportado pela cultura sem, contudo, acréscimos significativos na produtividade, o que a tornava economicamente inviável. Nessas condições, ocorria o consumo de luxo. Trabalhos iniciais na década de 80 demonstraram que a curva de resposta à adubação possuía uma faixa linear seguida de um platô-parabólico, e que existe um limite superior máximo que corresponde ao ponto em que o nutriente é o único fator a limitar a produtividade da cultura (DOBERMANN, 2001).

Esse ponto é conhecido como nível crítico (NC), e é utilizado como referência para a aplicação de fertilizantes. O NC corresponde ao teor de um nutriente, em uma parte índice da planta ou no solo, que se correlaciona com uma produtividade de 90% em relação à máxima produtividade da mesma (CANTARUTTI et al., 2007).

Os níveis críticos de K⁺ no solo citados na literatura para a cana variam. Orlando filho et al. (1981) sugeriram nível crítico de 2,3 mmol_c dm⁻³, Rodella et al. (1983) sugeriram 2,0

mmolc dm⁻³, Raij (1974) de 2,1, Chalita (1991) sugeriu 1,5 e 1,2 para cana planta e soca, respectivamente, e o manual do IPA (2008) sugere 1,5 mmol_c dm⁻³.

Essas variações são função do tipo e características do solo, pois alguns solos podem promover maior imobilização do nutriente, necessitando, assim, da aplicação de doses mais elevadas para que os teores no solo alcancem valores de suficiência para a necessidade da cultura.

Por exemplo, em relação à mineralogia e tipo de solo, foi observado que em solos do Estado da Paraíba solos das ordens Neossolo, Planossolo e Vertissolo, os quais possuem minerais do tipo 2:1, quando aplicadas doses de K⁺, promoveram fixação na forma não-trocável visto as curvas de recuperação do K⁺ trocável pelo aplicado terem obtido coeficiente angular inferior a 1. Enquanto que em solos mais desenvolvidos, como Latossolos e Argissolos, o coeficiente angular foi igual ou superior a 1, o que indica que todo o fertilizante potássico aplicado foi recuperado pelo extrator (MEDEIROS et al., 2014).

Apesar da passagem de formas disponíveis de K⁺ para não-disponíveis ser ruim para as plantas, as mesmas não possuem comportamento passivo ao solo, ou seja, mesmo formas não-trocáveis podem ser absorvidas e contribuir para sua nutrição (SILVA et al., 2000), contudo, em quantidade menor do que as trocáveis. Esse fato também foi observado em Latossolo com baixo teor de K⁺ trocável com cultivo de pinus (ALVES et al., 2013).

O equilíbrio entre o K⁺ na solução e o trocável é dependente dos teores e qualidade da argila, além da CTC que o solo apresenta. Solos com teores mais elevados de argila, ricos em minerais 2:1 e com maior CTC promovem menores teores de K⁺ em solução, ou seja, teores prontamente disponíveis para as plantas. O contrário é observado para solos mais desenvolvidos com menor teor de argila, CTC e maior teor de minerais 1:1 (MEDEIROS et al., 2014).

Dessa forma, níveis críticos de K⁺ obtidos em solos com maior CTC, especialmente solos com minerais 2:1, são maiores do que em solos mais arenosos (ERNANI et al., 2007), motivo para a adoção de diferentes níveis críticos de acordo com a CTC, teor de argila ou outra característica do solo. Ainda mais, a dose a ser aplicada em solos mais argilosos é maior do que a de solos mais arenosos. Sendo que, para o trigo, para cada acréscimo de 10% no teor de argila é necessário aumento na dose entre 8 a 9 kg ha⁻¹ (WIETHOLTER, 2007).

Desta forma, considerar qual tipo de solo e, principalmente, suas características como CTC, teor de argila e mineralogia, consiste em um importante fator na tomada de decisão a fim de suprir adequadamente as culturas, especialmente, as de ciclo curto que necessitam de disponibilidade imediata de K^+ .

A variedade também possui importante papel na definição do NC. Em estudo com seis variedades de cana a doses de K^+ , foi observado que a dose de máxima eficiência econômica, a que corresponde a 90% da produtividade de máxima eficiência agrônômica, variou entre 94 a 165 kg ha⁻¹ de K_2O (UCHÔA et al., 2009). Essa variação é devido ao potencial genético da cultivar, a qual pode extrair mais K^+ do que outras. Em estudo com 11 cultivares de cana, (OLIVEIRA et al., 2011) observaram variação na extração de K^+ de 212 a 400 kg ha⁻¹. Apesar desse fato, a recomendação para adubação potássica é realizada para variedades que já foram substituídas (IPA, 2008), o que pode levar a subestimação da adubação.

2.5. Produtividade e Qualidade Agrotecnológica da cana sob manejo da adubação potássica

O aumento da produtividade da cana-de-açúcar em razão da dose de K^+ aplicada é relatado na literatura (UCHÔA et al., 2009; OTTO et al., 2010; CAIONE et al., 2011; FLORES et al., 2014; ALMEIDA et al., 2015) podendo, esse aumento, chegar a 75 Mg ha⁻¹ (ALMEIDA et al., 2015); ter incremento de produtividade de 186% (UCHÔA et al., 2009); ter aumento aproximado de 20 t ha⁻¹ de colmos pela dose de 166 kg ha⁻¹ de K_2O + 71 kg ha⁻¹ de N em relação à dose controle (0 kg ha⁻¹ de K_2O e N) (OLIVEIRA et al., 2014a). Bem como a ausência de efeito também já foi observada (ROSSETTO et al., 2004).

O aumento da produtividade da cana pelas doses de fertilizantes potássicos aplicados, geralmente, é acompanhado pelo aumento do número, diâmetro e altura de colmos em cana-planta e soca (UCHÔA et al., 2009; CAIONE et al., 2011). Outro estudo, contudo, em cana-soca, aos 120 após emergência, não observou aumento do número de perfilhos e diâmetro dos colmos em socaria adubada com doses de K_2O até 195 kg ha⁻¹. Mas foi observado aumento da altura dos colmos pela aplicação das doses (FLORES et al., 2012).

Aumento da produtividade e redução da aplicação de adubos potássicos é um fato desejoso para a agricultura. Uma das razões é o aumento da demanda por este insumo aliada a dependência de importação, aproximadamente 90% do consumido no país, e as baixas reservas das jazidas encontradas no Brasil as quais podem ser exauridas até 2021 (LOPES, 2005).

A melhoria da qualidade agrotecnológica (ATR e brix) da cana pela aplicação de K^+ é tema controverso (KWONG, 2002; WATANABE et al., 2015).

Estudos iniciais sobre a translocação de fotoassimilados em folhas de cana por técnicas isotópicas ainda na década de 60 demonstraram que plantas deficientes em K^+ apresentaram retardo na translocação de fotoassimilados marcados com ^{14}C para a parte basal da folha bem como para os órgãos drenos (HARTT, 1969, 1970), mesmo quando a taxa fotossintética não é alterada pela deficiência de K^+ na folha.

Uma importante função do K^+ na planta é o transporte de fotossintatos das fontes para os drenos. O carregamento ativo de açúcar para o floema é acoplado por canais simporte de H^+ que despolarizam o potencial da membrana. A despolarização da membrana promove feedback negativo na absorção de açúcares. A despolarização promovida pelo transporte H^+ /açúcar é contra atuado pelo efluxo de K^+ devido à alta atividade do canal de K^+ AKT2. Isso segura o potencial da membrana perto do equilíbrio potencial de K^+ (E_K) e promove meio para maior acumulação de açúcares (ANSCHÜTZ et al., 2014).

Wang et al. (2012), em ensaio com duas variedades de algodão, sendo uma eficiente e uma ineficiente à absorção de K^+ , observaram que ambas quando em solução nutritiva com baixo teor de K^+ diminuíram a translocação de açúcares solúveis do floema e ocorreu aumento dos teores de sacarose, açúcares redutores e açúcares solúveis na folha, principalmente, na variedade com baixa eficiência de absorção de K^+ .

Em revisão de literatura feita por Kwong (2002), o autor não constatou aumento dos teores de sacarose na cana em função da aplicação de K^+ . Ao contrário, o autor discute que o benefício da aplicação de K^+ se dá pelo aumento da produtividade da cultura, e não pelo aumento de sacarose no caldo da cana. Sendo que, a qualidade agrotecnológica é função, primeiramente, da variedade, do clima e da fertilidade do solo.

O Brix° (teor de sólidos solúveis) da cana, em avaliação com 6 variedades comerciais e cinco doses de K^+ não foi modificado em nenhuma das variedades (UCHÔA et al., 2009), mesmo com dose máxima de 320 kg ha^{-1} de K_2O . O mesmo foi observado por Caione et al. (2011), no segundo ciclo da cana, com dose máxima de 240 kg ha^{-1} de K_2O .

Em avaliação de 6 variedades de cana sob três regimes hídricos e seis doses de K^+ e N, chegando as doses de K^+ a 166 kg ha^{-1} , os autores não observaram diferenças no brix° para as

doses de K^+ , sendo constatada diferenças nesse parâmetro somente para a variedade (OLIVEIRA et al., 2014a).

Contudo, estudos recentes demonstraram que o aumento do teor de K^+ na cana diminui o conteúdo de sacarose, quando o K^+ foi aplicado na forma de KCl. Quando a fonte K^+ foi o K_2SO_4 , foi observado aumento do conteúdo de sacarose no final do experimento. Os autores afirmam que a diminuição da concentração de sacarose no caldo é função do Cl^- (WATANABE et al., 2015). O KCl é o principal fertilizante potássico utilizado na cana, desta forma, altas doses ou o acúmulo das doses aplicadas durante sucessivos cultivos podem ter promovido elevação dos teores de Cl^- no solo, e, assim, a diminuição da sacarose por efeito tóxico desse nutriente.

2.6. Atuação fisiológica do K^+ nas plantas

O K^+ é um elemento essencial que possui papel biofísico e bioquímico nas plantas. Sua atuação biofísica reside na promoção de turgor necessário para a expansão celular e controle estomático. Já seu papel bioquímico está relacionado com a ativação de vários complexos enzimáticos envolvidos no metabolismo de carboidratos, proteínas e transporte de fotossintatos (FISCHER; HSIAO, 1968; FISCHER, 1970; LEIGH; WYN JONES, 1984; ANDERSON; BOWEN, 1992; TAIZ; ZEIGER, 2004).

O funcionamento estomático é regido pela entrada e saída de íons (Na^+ e K^+) das células guarda. A entrada de íons promove a turgidez dessas células o que ocasiona a abertura dos estômatos. De maneira inversa, a saída de íons promove a perda de turgidez e fechamento estomático (TAIZ; ZEIGER, 2004). Esse mecanismo é mediado pelas concentrações dos hormônios ácido abscísico (ABA) e citocinina produzidos nas raízes e folhas. O aumento das suas concentrações promove o fechamento estomático (BEIS; PATAKAS, 2015).

Contrariamente, o hormônio etileno possui ação anti ABA, ou seja, o aumento da sua concentração inibe ação do ABA no fechamento estomático (BENLLOCH-GONZÁLEZ et al., 2010), adicionalmente, a deficiência de K^+ promove elevação das concentrações de etileno nas raízes (ZHANG et al., 2009), o que ocasiona problemas no fechamento estomático e, conseqüentemente, maior transpiração.

Assim como citado por Benlloch-González et al. (2010), seria lógico pensar que em condições de baixo suprimento de K^+ as plantas apresentariam dificuldades na manutenção da abertura estomática, ou seja, a deficiência de potássio promoveria redução da transpiração e

consequente diminuição da perda de água. No entanto, quando sob estresse hídrico, a deficiência de K^+ ocasiona mal funcionamento estomático. Nessas condições, observa-se reduzida eficiência no fechamento dos estômatos como pode ser observado pelos maiores valores de condutância estomática (g_s) em comparação às não deficientes (BENLLOCH-GONZÁLEZ et al., 2008; 2010).

No entanto, também foi observado que a deficiência severa de K^+ pode inibir a transpiração, e que a substituição parcial do K^+ pelo Na^+ promove, até mesmo, maior crescimento, taxas fotossintéticas e de condutância estomática do que plantas supridas somente com K^+ (TOMEMORI et al., 2002).

Não obstante, mesmo sob déficit nutricional de K^+ , as plantas podem manter a produção de biomassa em nível semelhante ao de plantas bem nutridas como foi observado em girassol em solução nutritiva. A deficiência de K^+ não ocasionou diferenças na produção de biomassa, contudo, houve menor eficiência do uso de água, ou seja, houve maior consumo de água para produção da mesma quantidade de matéria (FOURNIER et al., 2005).

O mesmo fato foi observado para a cana em solução nutritiva (VALE et al., 2011). Isto é explicado pela ausência de restrição hídrica, o que ocasiona maior consumo de água, mas não prejudica a planta no seu crescimento inicial. No entanto, a falta de K^+ prejudica a produção final da cultura.

Sob condição de restrição hídrica, o K^+ quando em consumo de luxo pode promover maior taxa fotossintética e melhor utilização da água do solo (KANT; KAFKAFI, 2002).

Concentração de K^+ inferiores a 0,8% de massa seca demonstrou limitar a taxa de assimilação líquida de CO_2 (A , fotossíntese líquida), sendo que a limitação da fotossíntese proporcionada pela redução da condutância estomática (g_s) diminui com o aumento do suprimento de K^+ . Contudo, processos bioquímicos da fotossíntese que são influenciados pelo K^+ como taxa de máxima carboxilação da Rubisco ($V_{c_i\max}$) e taxa máxima de transporte de elétrons (J_{\max}) possuem papel mais importante na redução da taxa fotossintética do que a g_s em condição de restrição nutricional de K^+ (JIN et al., 2011).

A aplicação de doses elevadas de K^+ pode regular a transpiração mesmo sob condições de maior tensão da água no solo, ou seja, quando o solo está secando. Em experimento com duas doses de K^+ (15 mg dm^{-3} e 120 mg dm^{-3}) e quatro tensões de água no solo ($0,03$; $0,05$; $0,10$ e $0,50 \text{ MPa}$) em milho, observou-se que, quando aplicado 120 mg dm^{-3} de K^+ no solo,

a transpiração reduziu e manteve-se constante para todas as tensões de água em comparação com o tratamento com aplicação de 15 mg dm^{-3} que apresentou taxa de transpiração 30% superior quando a tensão foi de 0,50 MPa (ROSOLEM et al., 2003), o que confirma a importância do K^+ na regulação da transpiração.

Quando ocorre o processo de secamento do solo, as plantas para manutenção da turgidez e da absorção de água promovem maior redução do potencial osmótico da planta pelo aumento da concentração de osmólitos celulares. Os osmólitos produzidos a fim de promover o ajuste osmótico são sais, açúcares ou aminoácidos. No entanto, a atividade metabólica da planta promovida pela planta para síntese desses osmólitos são dependentes da utilização de fotoassimilados. O K^+ é um importante osmólito nas plantas e sua absorção e armazenamento possui custo energético muito menor para a planta do que a produção de osmólitos orgânicos (ZÖRB et al., 2014).

As concentrações de K^+ possuem importante papel na condutância hidráulica do xilema e nas relações hídricas da planta. O aumento da concentração de K^+ de 3 para 12 mM no xilema pode promover aumento na condutância hidráulica de 30 a 60%. Isso é devido à interação do íon K^+ com a matriz pécica dos poços intervasos do xilema. As pectinas formam géis carregados e se comportam como polieletrólitos, que incham em soluções diluídas e se contraem em soluções saturadas devido à neutralização das cargas negativas de grupos carboxílicos pelo K^+ . Isso promove mudança dos tamanhos de poros nanométricos, modulando, assim, a resistência do fluxo de água pelos buracos e por toda a rede do xilema. Esse papel do K^+ sobre a condutância hidráulica do xilema é considerado uma importante forma adaptativa da planta em manter o turgor celular, abertura estomática e trocas gasosas quando em condições de estresse hídrico moderado (ANSCHÜTZ et al., 2014).

Em relação a seu papel bioquímico, o controle o pH do citosol consiste em um importante mecanismo desempenhado pelo K^+ que, por sua vez, influenciam diretamente a atividade enzimática. Em plantas de cevada, a diminuição de cada 10 mM de K^+ promoveu diminuição 0,2 unidades no pH no citosol (WALKER et al., 1996).

Redução maior do pH citosólico de 7,7 para 6,5 sob deficiência de K^+ também já foi observada. Essa faixa de pH promove redução quase completa da atividade da enzima redutase do nitrato (PFLÜGER; WIEDEMANN, 1977). A importância do K^+ para o metabolismo de NO_3^- , ou seja, redução desse ânion e síntese de proteína, também foi observada por Wakhloo e Glaser (1980). Segundo os autores acima citados, concentração de $50 \mu\text{M g}^{-1}$ no

tecido fresco de tomate promove maior percentagem de nitrogênio redutor incorporado à proteína. Concentrações acima de $50 \mu\text{M g}^{-1}$, bem como abaixo desse valor, podem promover acúmulo de nitrogênio não proteico nas folhas dependendo da disponibilidade de NO_3^- (WAKHLOO; GLASER, 1980).

Ademais, o transporte de NO_3^- no xilema para as folhas é dependente do K^+ . O K^+ atua como um contraíon para o transporte em longa distância. Esse papel no balanço cátion-ânion produz efeito direto no metabolismo do NO_3^- , bem como no seu armazenamento no vacúolo (ZÖRB et al., 2014).

Em células radiculares de plântulas de cevada foi observado que a supressão de K^+ ocasionou diminuição do pH 7,4 para 7,0, e, conseqüente, redução da síntese de proteína (WALKER et al., 1998).

Diversas enzimas já foram identificadas as quais necessitam de K^+ para ativação, tanto em plantas como em animais. Em plantas, enzimas envolvidas na fosforilação como: CoAligase, L-cisteína, descarboxilase do oxalacetato, e na síntese de amido, amido sintetase, são de longa data conhecidas (SUELTER, 1970).

Em cana-de-açúcar a resposta ao déficit nutricional de K^+ ocorre rapidamente, sendo as mudanças transcriptacionais observadas em até 08h após sua ocorrência (ZENG et al., 2015). Nesse artigo, os autores observaram diversas mudanças gênicas promovidas pelo baixo teor de K^+ . A planta promove aumento da expressão gênica de proteínas responsáveis pelo transporte de potássio (alta e baixa afinidade, além de canais de K^+), pelo metabolismo de nitrogênio, fósforo, carboidratos e metabolismo secundário. Aumento da expressão de genes que codificam quinases e fosfatases, sendo essas responsáveis por processos de fosforilação e desfosforilação, além do aumento da expressão de genes relacionados ao estresse oxidativo.

O sistema radicular também sofre grande influência sob condições de déficit nutricional de K^+ . Em estudo com algodão em tratamento com baixa concentração de K^+ ($0,05 \text{ mol L}^{-1}$), foi observado que parâmetros morfológicos como comprimento da raiz primária principal, número de raízes laterais por plantas e área total radicular foram reduzidas. Este efeito está ligado à diminuição da concentração de AIA em 50% e do aumento da concentração de etileno em seis vezes (ZHANG et al., 2009).

A atuação no alongamento dos pelos radiculares e do gravitropismo também é uma das funções do K^+ . Tricoblástos, células responsáveis pelo crescimento de pelos radiculares,

são ativados quando transportadores de potássio, como TRH1 que pertence à família de transportadores de potássio KT/KUP/HAK da *Arabidopsis*, são ativados. Esse mecanismo é autônomo e independe da determinação celular, ou seja, mesmo em mutantes com inibição à iniciação dos pelos radiculares, quando cruzados com plantas que expressam TRH1, os duplos mutantes apresentaram crescimento de pelos radiculares (DARAS et al., 2015).

2.7. Papel do K⁺ na promoção de tolerância ao déficit hídrico em plantas

O déficit hídrico é um dos principais fatores que afetam a produtividade das culturas agrícolas. Esse termo corresponde ao teor de água na célula ou tecido quando abaixo do conteúdo de máxima hidratação (TAIZ ; ZEIGER, 2004). Sem o suprimento adequado de água as plantas reduzem seu metabolismo e param ou reduzem o crescimento, conseqüentemente, a produtividade é afetada. Estudos comprovam o efeito do déficit hídrico na redução da produtividade da cana (GAVA et al., 2011; ABREU et al., 2013) e no trigo (AOWN et al., 2012).

Para culturas de sequeiro, a precipitação pluviométrica é a única forma de fornecimento de água para as plantas. Exceto quando medidas emergenciais são realizadas para garantir a sobrevivência da cultura, como a irrigação de salvamento na cana-de-açúcar. De forma geral, mesmo em ambientes tropicais com elevada precipitação pluviométrica, a distribuição das chuvas é errática e apresenta-se concentrada em poucos meses do ano. Para a região Nordeste do Brasil, as chuvas concentram-se nos meses de março a agosto, assim, o déficit hídrico pode ocorrer nos demais meses do ano, se a cultura for de ciclo longo.

Figura 2 pode-se observar a irregularidade da precipitação pluviométrica para a região litorânea sul do Estado de Pernambuco e destacamos que entre os meses de setembro a março (sete meses) a precipitação pluviométrica é praticamente zero. Como pode ser observado na Figura 3, no Estado vizinho a Pernambuco, o déficit hídrico ocorre exatamente entre os meses de setembro a março. Ademais, juntamente com a baixa disponibilidade de água, as elevadas temperaturas que ocorrem nesses meses, que coincide com a estação do verão, acentuam o estresse abiótico na cultura.

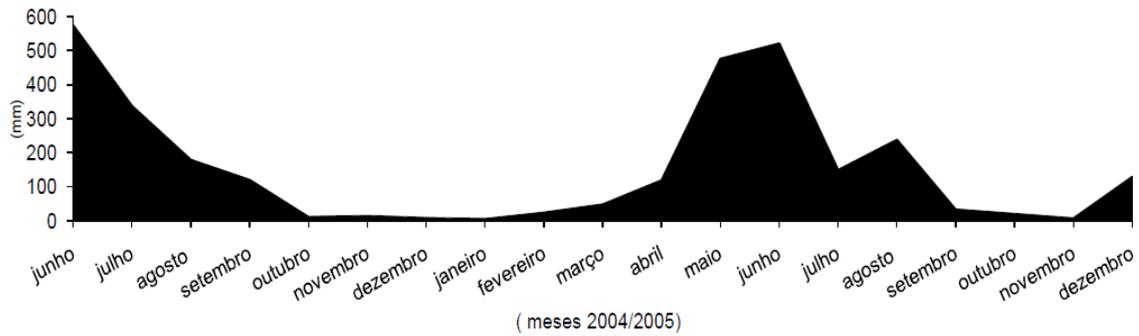


Figura 2. Pluviometria do período de junho de 2004 a dezembro de 2005, no município de Sirinhaém, litoral sul de Pernambuco (ROCHA et al., 2008)

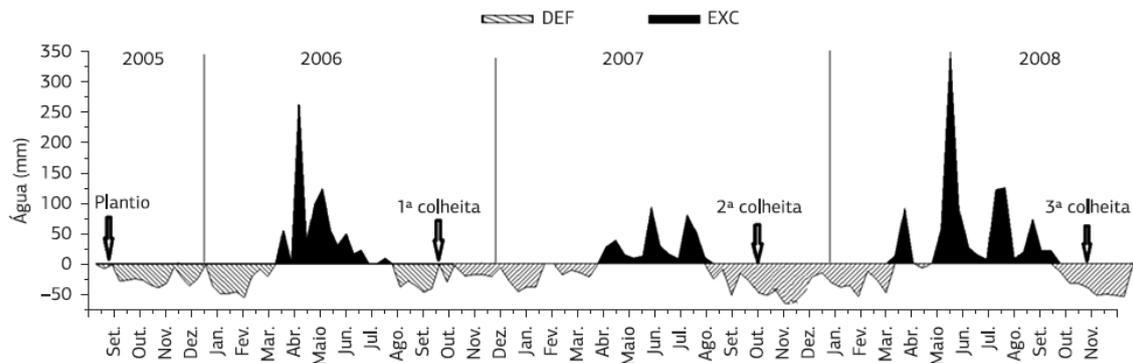


Figura 3. Balanço hídrico decendial da cultura, destaque para o déficit (DEF) e excesso (EXC) hídrico em cultivo de cana de açúcar (cana-planta, soca e rессoca) na região dos tabuleiros costeiros do estado de Alagoas no período de setembro de 2005 a novembro de 2008 (ABREU et al., 2013)

A escolha da variedade a ser utilizada e a época de plantio em determinada região são fatores importantes para evitar quedas de produtividade na cultura. Em avaliação com duas variedades de cana (IACSP 942094 e IACSP 962042), Machado et al. (2009) observaram que somente na variedade IACSP 962042, sob situação de déficit hídrico na fase de crescimento inicial (73 a 114 dias após plantio), ocorreu redução na produtividade.

O solo também apresenta importante papel sobre a severidade do déficit hídrico nas culturas. Solos com textura mais arenosa e baixa quantidade de matéria orgânica possuem menor capacidade de retenção de água do que solos com maior teor de argila e matéria orgânica, e, assim, são mais susceptíveis a promoção de déficit hídrico em plantas.

A retenção e a quantidade de água disponível estão diretamente relacionadas com a quantidade de macro e microporos e do teor de argila do solo (SOUZA et al., 2014), os quais

são função da textura, estrutura, além da ação da biota do solo. Os poros do solo são formados pelos vazios presentes na sua matriz. Esses vazios são formados pelos espaços entre agregados (micro e macroagregados) e os agregados são originados pela junção de partículas (areia, silte e argila) juntamente com a ação de agentes cimentantes como a matéria orgânica, óxidos, carbonatos e silicatos (BRONICK; LAL, 2005).

Segundo Taiz e Zeiger (2004), existem três estratégias que as plantas utilizam para tolerar o déficit hídrico: 1. Retardo a desidratação, que consiste na capacidade de manutenção da hidratação do tecido. As plantas podem realizar essa estratégia por dois métodos: a. Economia de água que corresponde as plantas que tem consumo moderado de água. Estas conservam parte da água no solo para posterior utilização; e b. Dispêndio de água que são as plantas que apresentam consumo irrestrito de água. 2. Tolerância à desidratação, consiste na capacidade da planta em manter seu metabolismo enquanto desidrata, e 3. Escape à seca, corresponde as plantas que completam seu ciclo de vida durante o período chuvoso. Ademais, os autores acima citados ainda citam três mecanismos de defesa contra a desidratação: 1. Redução de área e abscisão foliar, 2. Aprofundamento do sistema radicular, e 3. Fechamento estomático.

A capacidade de tolerância ao déficit hídrico é uma característica intrínseca das espécies vegetais e, mesmo, entre variedades. Plantas tolerantes reagem mais rapidamente a esse estímulo do que plantas sensíveis. Em cana-de-açúcar, por exemplo, quando o estresse é percebido, a variedade tolerante promove maior produção de proteínas relacionadas ao crescimento e aumento e manutenção do metabolismo ao contrário de plantas sensíveis que promovem a manutenção do status hídrico foliar (PACHECO, 2012; SALES et al., 2013).

Plantas sob déficit hídrico possuem expressão gênica diferenciada. Em estudo com duas variedades de trigo, sensível e tolerante à seca, observou-se que a variedade tolerante acumulou maior biomassa da parte aérea e radicular. Após realização de análises proteômicas, constatou-se que a cultivar tolerante apresentou aumento de abundância das proteínas relacionadas ao complexo antioxidativo, metabolismo e carboidratos e energia, fotossíntese e degradação e biogênese da parede celular em comparação com a sensível (FAGHANI et al., 2015).

O mecanismo de tolerância à desidratação, que corresponde à manutenção do metabolismo enquanto a planta desidrata, pode ser bem observado comparando-se cultivares tolerantes e sensíveis como demonstrado por (SALES et al., 2013). Em condições de estresse

hídrico, a cultivar de cana sensível promoveu o fechamento estomático e, desta forma, redução da condutância estomática (g_s) e da concentração de CO_2 intracelular de forma que o potencial hídrico foliar (Ψ_w) fosse mantido em níveis ótimos. Ao contrário, na cultivar tolerante foi observado menores valores para Ψ_w decorrente da manutenção das trocas gasosas. Dentre outros fatores, a tolerância à desidratação é razão da maior atividade de enzimas do complexo antioxidativo, tais como ascorbatoperoxidase (APX) e superóxido dismutase (SOD), que promovem a limpeza mais eficiente das espécies reativas de oxigênio (EROs) do que em cultivares sensíveis.

Adicionalmente, quando a planta se encontra sob estresse hídrico, ocorre aumento da quantidade de EROs as quais são danosas ao aparelho fotossintético e a integridade das membranas celulares. Os cloroplastos são as principais organelas responsáveis pela produção dessas substâncias (CAKMAK, 2005), no entanto as mitocôndrias, peroxissomos, retículo endoplasmático, citosol, membrana plasmática, parede celular e apoplasto também são sítios de produção de EROs (KARUPPANAPANDIAN et al., 2011), sendo os complexos enzimáticos e não enzimáticos antioxidativos responsáveis pela sua limpeza.

Em experimento com cana-de-açúcar sob dois regimes hídricos (irrigação contínua e suspensão de irrigação) e cinco níveis de salinidade (0, 25, 50, 75 e 100 mM) em condição de estresse de temperatura (35°C de temperatura diurna e 27°C noturna), a aplicação dos estresses promoveu aumento da atividade das enzimas do complexo antioxidativo, e diminuição da produção de massa fresca (AZEVEDO, 2013), o que se traduz em aumento de danos causados pelas EROs.

O papel do K^+ na tolerância ao estresse hídrico é resultante da sua atuação na alongação radicular e estabilidade da membrana celular, atividade de aquaporinas e absorção de água, no ajustamento osmótico, na regulação da abertura e fechamento estomático e na destoxificação de EROs (WANG et al., 2013).

A profundidade que o sistema radicular de uma cultura explora é fundamental para avaliar sua capacidade de tolerar períodos de seca devido possibilitar maior absorção de água com o aumento da profundidade explorada (VADEZ et al., 2012). Ademais, impedimento físico como a compactação do solo (SOUZA et al., 2012), ou químico (Al^{3+} em concentrações tóxicas) (TAKAHASHI et al., 2006) prejudicam o aprofundamento e distribuição do sistema radicular.

Além dos efeitos do ambiente para o crescimento radicular, o K^+ possui importante função no mecanismo fisiológico para o crescimento das raízes. Em estudo com algodão, a indução de deficiência nutricional de K^+ promoveu redução de 20% nas raízes laterais, 23% no comprimento das raízes primárias e 53% no número de raízes laterais em relação ao controle. Esse fato foi atribuído a redução das contrações de AIA e aumentaram as de etileno sobre as plantas em condição de déficit nutricional (ZHANG et al., 2009).

A manutenção da estabilidade e integridade da membrana celular é essencial para a tolerância ao déficit hídrico. As plantas quando sob estresse hídrico perdem eletrólitos de suas células sendo que o K^+ é o principal eletrólito perdido por efluxo. O estresse promovido pelo efluxo de K^+ ocasiona elevação das concentrações de EROs que, se prolongada e sob condição de estresse severo, pode ocasionar a morte da célula (DEMIDCHIK et al., 2014). As EROs são moléculas que promovem a quebra de organelas celulares, dentre elas as membranas celulares (BARBOSA et al., 2014). Apesar disso, quando o estresse é moderado, o efluxo de K^+ da célula é considerado como sendo uma via de sinalização para mudança da atividade metabólica celular de anabolismo para catabolismo a fim de manter energia para os reparos celulares (DEMIDCHIK et al., 2014).

As aquaporinas são as proteínas responsáveis pela absorção e condução de água e diversas outras moléculas através da membrana celular (CHAUMONT; TYERMAN, 2014; MAUREL et al., 2015). As aquaporinas e os canais de K^+ são proteínas ativadas sob estresse hídrico e são responsáveis pela manutenção do status hídrico celular. Os canais de K^+ possuem capacidade de alteração da atividade das aquaporinas e ambos são corregulados para manutenção da osmolaridade citosólica da célula em situação de seca ou outro estresse (WANG et al., 2013).

Uma importante medida realizada pela planta para tolerar o estresse hídrico é o ajustamento osmótico (JIANG et al., 2013). Dentre os necessários mecanismos para o ajustamento osmótico, os transportadores de K (KUP) possuem papel importante nesse processo. Esse transportador possui papel na manutenção da homeostase de K celular necessária para as respostas ao crescimento e seca (OSAKABE et al., 2013), ou seja, as plantas promovem aumento das concentrações de K^+ na folhas a fim de aumentar a retenção de água.

A deficiência nutricional de K^+ também é um fator responsável pelo aumento de EROs, conseqüente, aumento da atividade de enzimas do complexo antioxidativo. Observou-se que a proporção de aumento das EROs, bem como das enzimas, foi fator, também, da

cultivar. Contudo, sob desnutrição potássica, as plantas produziram menos massa seca do que sob adequado teor de K^+ (AHMAD et al., 2014).

A despeito do seu amplo papel biofísico e bioquímico, além de crescimento e de produtividade das plantas, o K^+ é fundamental na mediação de respostas adaptativas das plantas a diversos estresses abióticos, tais como seca, salinidade e estresse oxidativo, e bióticos, pragas e doenças, agindo como importante sinalizador das respostas adaptativas das plantas ao meio (ANSCHÜTZ et al., 2014).

Devido a isso, o consumo de “luxo” de K^+ é considerado um mecanismo capaz de promover a superação de condições adversas de clima (temperatura, seca), solo (salinidade) e bióticas (pragas e doenças) (KAFKAFI, 1990). Segundo Zörb et al. (2014), a preparação dos cultivares a períodos de estresse hídrico pela fertilização potássica em quantidades superiores as necessidades nutricionais, consiste em um manejo aconselhável.

2.8. Espécies reativas de oxigênio (EROs), sua produção e eliminação

As EROs são moléculas produzidas sob condições normais de metabolismo, apesar de ter ação deletéria para a célula quando em concentrações superiores à capacidade de detoxificação pelo seu aparato metabólico (NISHIYAMA et al., 2006; KARUPPANAPANDIAN et al., 2011).

Apesar da grande importância dada ao seu efeito prejudicial para a célula, as EROs são moléculas responsáveis pela sinalização intracelular em vários processos fisiológicos como a acumulação de hormônio de estresse (ácido jasmônico, etileno e ácido salicílico), indução de genes de defesa e respostas adaptativas (KARUPPANAPANDIAN et al., 2011), além da ativação de proteínas de transporte de alta afinidade pelo K^+ (ASHLEY et al., 2006). Tais funções consistem em um importante papel desempenhado por essas moléculas.

Todos os processos metabólicos da planta que envolvam o O_2 são passíveis de produção de EROs, tais como, respiração aeróbica, fotossíntese e fotorrespiração, que estão situadas, respectivamente, nas mitocôndrias, cloroplastos e peroxissomos. Ademais, vias de síntese bem como as de oxidação de moléculas biológicas, promovem a formação de EROs (BARBOSA et al., 2014).

Vários tipos de estresse causam superprodução de EROS, tais como seca, metais pesados, salinidade, frio, calor, herbicidas, ferimentos e patógenos (KARUPPANAPANDIAN et al., 2011; BARBOSA et al., 2014).

Em resposta ao déficit hídrico, a planta, fisiologicamente, promove o fechamento estomático o que ocasiona restrição na captura de CO_2 atmosférico e diminuição da perda de água por transpiração. Apesar da redução da transpiração após o fechamento estomático ser positiva para a hidratação da planta, a não interrupção da geração de elétrons produzidos pela fotossíntese, que em condições ideais são conduzidos para a redução do CO_2 e posterior produção de compostos orgânicos, são transferidos para o O_2 ocasionando a formação de EROs (CAKMAK, 2005).

Na Figura 4 pode-se observar que a formação de EROs é uma reação em cadeia. O primeiro passo para a formação de radicais superóxidos é a inibição do fluxo de CO_2 para o estroma nos cloroplastos, aumento da resistência do mesófilo e redução da atividade da atividade da ribulosebifosfatocarboxilase (RuBisCO). Essa inibição ocorre devido ao fechamento ou mau funcionamento estomático em condições de estresse, tais como de água, temperatura (frio) ou nutricional (K^+) (BENLLOCH-GONZÁLEZ et al., 2010; GONÇALVES et al., 2010; SALES et al., 2013; SANTOS et al., 2014).

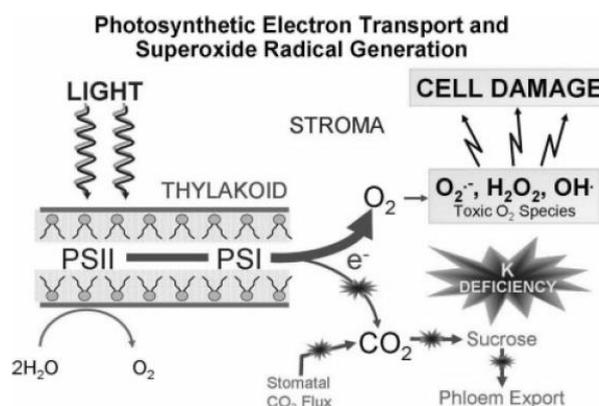


Figura 4. Representação esquemática da produção de radicais superóxidos em cloroplastos de folhas deficientes em K^+ (☀) refere-se a inibição da reação pela deficiência de K^+ (CAKMAK, 2005)

As EROs incluem o radical superóxidos ($\text{O}_2^{\bullet-}$), radical hidroxila (OH^{\bullet}), radical hidroperóxil (OH_2^{\bullet}), peróxido de hidrogênio (H_2O_2), radical alcoxi (RO^{\bullet}), radical peróxido (ROO^{\bullet}), oxigênio singleto ($^1\text{O}_2$) e carbonil excitado (RO^*), sendo todos citotóxicos para a planta quando acima da capacidade de limpeza pelo seu sistema metabólico (KARUPPANAPANDIAN et al., 2011).

Foi estimado que 1 a 2% do O_2 consumido pelas plantas são transformados em EROs em diferentes locais, tanto por transferência de energia ou de elétrons. A transferência de um

único elétron para o O_2 transforma-o em $^1O_2^-$. O $^1O_2^-$, por não poder atravessar membranas, pode ser facilmente dismutado a H_2O_2 . HO_2° é formado a partir do $^1O_2^-$ por protonação em meio aquoso. H_2O_2 pode produzir OH^- pela reação Haber-Weiss/Fenton (KARUPPANAPANDIAN et al., 2011).

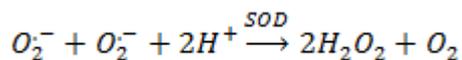
As EROs produzem danos em várias estruturas celulares, em especial, nas estruturas lipídicas e no DNA. Dentre as diferentes EROs, o 1O_2 possui importante papel na peroxidação lipídica, sendo determinante para a morte celular. Células em fase de morte aumentam a concentração de 1O_2 do que outras formas de EROs (TRANTAPHYLIDÈS et al., 2008).

Danos ao fotossistema II (PSII) são atribuídos a sua própria susceptibilidade à luminosidade devido a elevação dos níveis intracelulares de EROs, em especial o 1O_2 . Essas moléculas não possuem papel direto nos danos causados ao PSII. As EROs, ao contrário, atuam na inibição dos mecanismos de reparo do PSII. Dentre esses mecanismos, a inibição da tradução do mRNApsbA na fase de alongação não permite a recuperação da proteína D1 essencial para o PSII. Devido a isso, o centro de reação do PS-II é reconstruído a cada 30 minutos, mesmo em condições de baixa irradiação solar (NISHIYAMA et al., 2006; BARBOSA et al., 2014).

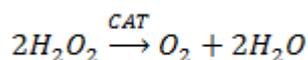
Para impedir os danos causados pela superprodução de EROs, as plantas possuem mecanismos enzimáticos e não enzimáticos que promovem a limpeza desses elementos prejudiciais. As enzimas responsáveis pela eliminação dessas moléculas são: Catalase (CAT) (EC 1.11.1.6), peroxidase do ascorbato (APX) (EC 1.11.1.11), guaiacol peroxidase (GPX) (EC 1.11.1.7), superóxido dismutase (SOD) (EC 1.15.1.1), redutase do monodehidroascorbato (MDHAR) (EC 1.6.5.4), redutase do dehidroascorbato (DHAR) (EC 1.8.5.1), redutase da glutathiona (GSHR) (EC 1.6.4.2), e mecanismos não enzimáticos: Ácido ascórbico (AA), glutathiona (GSH), tocoferóis (TOCs), carotenóides (CARs), compostos fenólicos (flavonóides, taninos, lignina etc.) (KARUPPANAPANDIAN et al., 2011).

Os sistemas de defesa enzimáticos e não enzimáticos mais estudados contra as EROs são: CAT, SOD, APX e carotenóides. As principais características desses sistemas de defesa segundo Karuppanapandian et al. (2011) são:

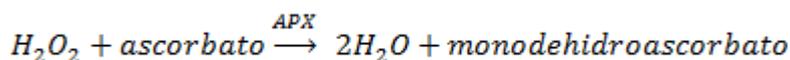
A família SOD de metaloenzimas catalisa a dismutação do O_2° em H_2O_2 e O_2 . As SODs são divididas em três tipos de acordo com seu cofator metálico: Fe-SOD (presente nos cloroplastos), Mn-SOD (mitocôndrias) e Cu/Zn-SOD (presente em peroxissomos, cloroplastos e citosol). É encontrada no citoplasma, cloroplasto, peroxissomos e mitocôndria



A CAT é uma enzima que promove a dismutação do H₂O₂ em H₂O e O₂ nos peroxissomos. A CAT possui várias isoformas encontradas em diferentes espécies. CAT é muito sensível à luz e possui taxa de turnover muito rápida. Essa renovação rápida pode ser devido ao grupo heme que absorve luz ou a inativação de H₂O₂. Qualquer estresse que reduza o turnover de proteínas, tal como seca, reduz a atividade da CAT. É encontrada em peroxissomos, glioxissomos e mitocôndria



A APX possui mesmo papel de dismutação que a CAT possui, contudo, sua atividade está presente no cloroplasto e citosol. A APX utilizando o ascorbato como doador de hidrogênio quebra o H₂O₂ e produz H₂O e monodehidroascorbato. É encontrado no citoplasma, peroxissomos, cloroplasto e mitocôndria.



Os CARs são compostos lipofílicos localizados em plastídios fotossintéticos e não fotossintéticos. Nos cloroplastos, os CARs atuam como pigmentos acessórios na absorção de luz, no entanto, seu papel na limpeza das EROs seja mais importante. Seu papel antioxidante se dá pela limpeza de ¹O₂ e dissipação da energia como calor.

Por esse motivo, a melhoria da nutrição potássica em plantas consiste em uma importante estratégia para a redução da produção de EROs, e, conseqüentemente, maior tolerância das plantas à estresses como seca e elevada intensidade luminosa (CAKMAK, 2005).

2.9. Avaliação do estado nutricional da cana

A avaliação do estado nutricional corresponde à determinação das concentrações dos teores dos nutrientes presentes em um órgão índice da planta os quais podem estar adequados, em deficiência ou toxidez (FONTES, 2001). Alguns autores já identificaram faixas de suficiência para os teores ótimos em diferentes variedades de cana, sendo a folha +1 ou +3 o órgão índice utilizado (Tabela 1).

A avaliação do estado nutricional da cana é importante para a correção de deficiências nutricionais a fim de que a produtividade não seja comprometida (REIS JR e MONNERAT,

2003) e para avaliação da dose de fertilizante requerida pelas culturas a fim de que o teor de determinado nutriente alcance o nível crítico e propicie máxima produção econômica (PEREIRA et al., 1995). Além disso, o estado nutricional é um importante parâmetro agrônomo para a seleção de variedades mais eficientes no uso de nutrientes disponíveis nos diferentes tipos de solo (MOURA FILHO et al., 2014), em especial, o estado nutricional se torna uma importante ferramenta para a avaliação das novas variedades quanto a sua eficiência nutricional nos diferentes ambientes de produção, pois os teores foliares possuem correlação com os teores dos nutrientes encontrados no solo (SPRINGOB et al., 1995; SILVA et al., 2015).

O estabelecimento dos teores adequados de nutrientes e sua determinação em plantios comerciais são de grande importância para a identificação dos nutrientes que estão impedindo a expressão do máximo potencial produtivo da cultura (REIS JR e MONNERAT, 2002) e, com isso, racionalizar a utilização de fertilizantes, em especial dos nutrientes que estejam em níveis suficientes ou acima, de forma a promover redução dos custos de produção.

Contudo, uma das dificuldades no estabelecimento de níveis críticos de nutrientes em folhas de cana é devido às diferentes capacidades de acumulação dos nutrientes pelas variedades. Por exemplo, em experimento com três variedades de cana foi observado diferenças significativas nos teores foliares de K, P, Ca, Mg, Fe, Mn e Zn entre as mesmas (OLIVEIRA et al., 2014b).

Os métodos mais utilizados para avaliação do estado nutricional são o nível crítico e as faixas de suficiência, no entanto, outros métodos como DRIS, ChM e diagnose da composição nutricional também são utilizados (PÍPERAS et al., 2009; SANTOS et al., 2013).

Um fator importante na avaliação do estado nutricional de canaviais consiste em saber com quais referenciais de teores de nutrientes eles serão comparados. Por exemplo, em estudo em canaviais comerciais de Campos dos Goytacazes/RJ, Santos et al. (2013) observaram que quando as lavouras foram avaliadas por padrões de teores de nutrientes calibrados regionalmente os nutrientes que apresentaram limitação para a produtividade foram K, P e S. Já quando a diagnose nutricional foi realizada com padrões descritos na literatura os nutrientes que apresentaram limitação à produtividade foram N, Cu e Zn.

Devido a influencia dos diferentes ambientes de produção (solo, clima etc) e das próprias variedades de cana sobre o teor foliar de nutrientes, a avaliação do estado nutricional das novas variedades com variedades já consolidadas em determinado ambiente se torna necessária a fim de comprovar o potencial agrônomo da nova variedade para o mercado.

Tabela 1. Faixas adequadas de nutrientes para a cana-de-açúcar

Nutrientes										Folha índice	Citação
-----g kg ⁻¹ -----					-----mg kg ⁻¹ -----						
N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn		
16,6-19,3	1,6-2,6	8,3-12,1	2,8-4,5	1,7-3,1	0,7-1,2	3,5-4,9	50,5-70,4	11,8-17,9	4,0-10,5	+3	(MOURA FILHO et al., 2014)
18-25	1,5-3,0	10-16	2,0-8,0	1,0-3,0	1,5-3,0	6-15	40-250	10-50	25-250	+1	(EMBRAPA, 2009)

Referências Bibliográficas

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

AHMAD, P.; ASHRAF, M.; HAKEEM, K. R.; AZOOZ, M.; RASOOL, S.; CHANDNA, R.; AKRAM, N. A. Potassium starvation-induced oxidative stress and antioxidant defense response in *Brassica juncea*. **Journal of Plant Interactions**, Turin, v. 9, n. 1, p. 1-9, 2014.

ALMEIDA, H. J.; CRUZ, F. J. R.; PANCELLI, M. A.; FLORES, R. A.; VASCONCELOS, R. L.; PRADO, R. M. Decreased potassium fertilization in sugarcane ratoons grown under straw in different soils. **Australian Journal of Crop Science**, Lismore, v. 9, n. 7, p. 596-604, 2015.

ALVES, M. J. F.; MELO, V. F.; REISSMANN, C. B.; KASEKER, J. F. Reserva mineral de potássio em Latossolo cultivado com *Pinus taeda* L. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1599-1610, 2013.

ANDERSON, D. L.; BOWEN, J. E. **Nutrição da cana-de-açúcar**. Piracicaba: Potafós, 1992. 40 p.

ANSCHÜTZ, U.; BECKER, D.; SHABALA, S. Going beyond nutrition: regulation of potassium homeostasis as a common denominator of plant adaptive responses to environment. **Journal of Plant Physiology**, Germany, v. 171, n. 9, p. 670-687, 2014.

AOWN, M.; RAZA, S.; SALEEM, M. F.; ANJUM, S. A.; KHALIQ, T.; WAHID, A. M. Foliar application of potassium under water deficit conditions improved the growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). **The Journal of Animal & Plant Science**, Kenya, v. 22, n. 2, p. 431-437, 2012.

ASHLEY, M. K.; GRANT, M.; GRABOV, A. Plant responses to potassium deficiencies: a role for potassium transport proteins. **Journal of Experimental Botany**, United Kingdom, v. 57, n. 2, p. 425-436, 2006.

AZEVEDO, V. M. **Ação combinada de fatores abióticos de estresse em cana-de-açúcar: variáveis fisiológicas e bioquímicas**. 2013. 57 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal rural de Pernambuco, Recife, 2013.

BARBOSA, M. R.; SILVA, M. M. A.; WILLADINO, L. G.; ULISSES, C.; CAMARA, T. R. Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 3, p. 453-460, 2014.

BEIS, A.; PATAKAS, A. Differential physiological and biochemical responses to drought in grapevines subjected to partial root drying and deficit irrigation. **European Journal of Agronomy**, Germany, v. 62, p. 90-97, 2015.

BENLLOCH-GONZÁLEZ, M.; ARQUERO, O.; FOURNIER, J. M.; BARRANCO, D.; BENLLOCH, M. K⁺ starvation inhibits water-stress-induced stomatal closure. **Journal of Plant Physiology**, Germany, v. 165, n. 6, p. 623-630, 2008.

BENLLOCH-GONZÁLEZ, M.; ROMERA, J.; CRISTESCU, S.; HARREN, F.; FOURNIER, J. M.; BENLLOCH, M. K⁺ starvation inhibits water-stress-induced stomatal closure via ethylene synthesis in sunflower plants. **Journal of Experimental Botany**, United Kingdom, v. 61, n. 4, p. 1139-1145, 2010.

BRITTO, D. T.; KRONZUCKER, H. J. Cellular mechanisms of potassium transport in plants. **Physiologia Plantarum**, Scandinavia, v. 133, n. 4, p. 637-650, 2008.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, Netherlands, v. 124, n. 1-2, p. 3-22, 2005.

CAIONE, G.; SILVA, A. F.; REIS, L. L.; DALCHIAVON, F. C.; TEIXEIRA, M. T. R.; SANTOS, P. A. Doses de potássio em cobertura na primeira soca da cana-de-açúcar cultivada no norte Matogrossense. **Bioscience Journal**, Uberlandia, v. 27, n. 4, p. 572-580, 2011.

CAKMAK, I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Germany, v. 168, n. 4, p. 521-530, 2005.

CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F.; MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V, V. H.; BARROS, N. F. D.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. Cap.XIII. p. 769-850.

CHAUMONT, F.; TYERMAN, S. D. Aquaporins: Highly Regulated Channels Controlling Plant Water Relations. **Plant Physiology**, United Kingdom, v. 164, n. 4, p. 1600-1618, 2014.

CHALITA, R. **Calibração da adubação potássica através da análise química do solo para a cultura da cana-de-açúcar**. 1991. 75 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas), Esalq/USP, Piracicaba, 1991.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, v. 1. n. 3, 2016. 78 p.

CORTEZ, L. A. B. **Universidades e empresas: 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro**. Sao Paulo: Blucher, 2016. 224 p.

COSTA, D. B. **Adubação fosfatada da cana-de-açúcar: disponibilidade de fósforo e formas de aplicação**. (2012). 98 f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) – Universidade Federal rural de Pernambuco, Recife, 2012.

DARAS, G.; RIGAS, S.; TSITSEKIAN, D.; IACOVIDES, T. A.; HATZOPOULOS, P. Potassium transporter TRH1 subunits assemble regulating root-hair elongation autonomously from the cell fate determination pathway. **Plant Science**, United States of America, v. 231, p. 131-137, 2015.

DEMIDCHIK, V.; STRALTSOVA, D.; MEDVEDEV, S. S.; POZHVANOV, G. A.; SOKOLIK, A.; YURIN, V. Stress-induced electrolyte leakage: the role of K⁺-permeable channels and involvement in programmed cell death and metabolic adjustment. **Journal of Experimental Botany**, United Kingdom, 2014.

DOBERMANN, A. R. Crop potassium nutrition-implications for fertilizer recommendations. **Agronomy and Horticulture**, Nebraska, 2001. 20 p. (paper 357)

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

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; SANTOS, F. C. Potássio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. D.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. Cap.IX. p. 551-594.

FAGHANI, E.; GHARECHAHI, J.; KOMATSU, S.; MIRZAEI, M.; KHAVARINEJAD, R. A.; NAJAFI, F.; FARSADEH, L. K.; SALEKDEH, G. H. Comparative physiology and proteomic analysis of two wheat genotypes contrasting in drought tolerance. **Journal of Proteomics**, Spain, v. 114, p. 1-15, 2015.

FISCHER, R. A. Role of potassium in stomatal opening in the leaf of *Vicia faba*. **Plant Physiology**, United Kingdom, v. 47, p. 555-558, 1970.

FISCHER, R. A.; HSIAO, T. C. Stomatal Opening in Isolated Epidermal Strips of *Vicia faba*. II. Responses to KCl Concentration and the Role of Potassium Absorption. **Plant Physiology**, United Kingdom, v. 43, n. 12, p. 1953-1958, 1968.

FLORES, R. A.; PRADO, R. M.; ALMEIDA, H. J.; PANCELLI, M. A.; MODA, L. R.; SANTOS, C. L. R. Potassium nutrition in sugarcane ratoons grown in oxisols by a conservationist system. **American-Eurasian Journal of Agriculture & Environment Science**, Egypt, v. 14, n. 7, p. 652-659, 2014.

FLORES, R. A.; PRADO, R. M.; POLITI, L. S.; ALMEIDA, T. B. F. Potássio no desenvolvimento inicial da soqueira de cana crua. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiania, v. 42, n. 1, p. 106-111, 2012.

FONTES, P. C. R. **Diagnóstico do estado nutricional das plantas**. Viçosa: UFV, 2001. 122 p.

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

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

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**, Campina Grande,, v. 14, n. 4, p. 378-386, 2010.

HARTT, C. E. Effect of potassium deficiency upon translocation of ¹⁴C in attached blades and entire plants of sugarcane. **Plant Physiology**, United Kingdom, v. 44, p. 1461-1469, 1969.

HARTT, C. E. Effect potassium deficiency upon translocation of ¹⁴C in detached blades of sugarcane. **Plant Physiology**, United Kingdom, v. 45, p. 183-187, 1970.

IPA. **Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco: 2ª aproximação** Recife: Instituto Agrônomo de Pernambuco - IPA, 2008. 212 p.

JIANG, J.; SU, M.; CHEN, Y.; GAO, N.; JIAO, C.; SUN, Z.; LI, F.; WANG, C. Correlation of drought resistance in grass pea (*Lathyrus sativus*) with reactive oxygen species scavenging and osmotic adjustment. **Biologia**, Slovakia, v. 68, n. 2, p. 231-240, 2013.

JIN, S. H.; HUANG, J. Q.; LI, X. Q.; ZHENG, B. S.; WU, J. S.; WANG, Z. J.; LIU, G. H.; CHEN, M. Effects of potassium supply on limitations of photosynthesis by mesophyll diffusion conductance in *Carya cathayensis*. **Tree Physiology**, United States of America, v. 31, n. 10, p. 1142-1151, 2011.

KAFKAFI, U. The functions of plant K in overcoming environmental stress situations. In: **Proceedings** of the 22nd colloquium of the international potassium institute, Soligorsk, USSR. International potash institute, p.81-94. 1990.

KAMINSKI, J.; BRUNETTO, G.; MOTERLE, D. F.; RHEINHEIMER, D. D. S. Depleção de formas de potássio do solo afetada por cultivos sucessivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1003-1010, 2007.

KANT, S.; KAFKAFI, U. Potassium and abiotic stresses in plants. In: Potash Institute of India, Gurgaon. **Potassium for sustainable crop production**, India, p. 233-251, 2002.

KARUPPANAPANDIAN, T.; MOON, J.-C.; KIM, C.; MANOHARAN, K.; KIM, W. Reactive oxygen species in plants: their generation, signal transduction, and scavenging mechanisms. **Australian journal of Crop Science**, Lismore, v. 5, n. 6, p. 709-725, 2011.

KWONG, K. F. N. K. The effects of potassium on growth, development, yield and quality of sugarcane. In: Potash Research Institute of India (PRII) and International Potash Institute (IPI). **Potassium for Sustainable Crop Production**. Horgen, Switzerland, 2002. p. 430-444.

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. **The New Phytologist**, United Kingdom, v. 97, n. 1, p. 1-13, 1984.

LOPES, A. S. Reservas de minerais potássicos e produção de minerais potássicos no Brasil. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed.). **Potássio na agricultura Brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa da potassa e do fosfato, 2005. Cap.2. p. 21-32.

LUCCHESI, A. A. Cana-de-açúcar (*Saccharum* ssp.). In: CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A. (Ed.). **Ecofisiologia de culturas extrativistas: cana-de-açúcar; seringueira; coqueiro; dendezeiro e oliveira**. Cosmópolis, SP: Stoller do Brasil, 2001. p. 138.

MACHADO, R. S.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, D. F. S. P.; MACHADO, E. C.; LANDELL, M. G. A. Respostas biométrica e fisiológicas ao deficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fisiológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 12, p. 1575-1582, 2009.

Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Cana-de-açúcar**. 2017. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>. Acesso em: 18/01/2017.

MAUREL, C.; BOURSIAC, Y.; LUU, D.-T.; SANTONI, V.; SHAHZAD, Z.; VERDOUCQ, L. Aquaporins in Plants. **Physiological Reviews**, Boston, v. 95, n. 4, p. 1321-1358, 2015.

MEDEIROS, J. S.; OLIVEIRA, F. H. T.; SANTOS, H. C.; ARRUDA, J. A.; VIEIRA, M. D. S. Formas de potássio em solos representativos do Estado da Paraíba. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 45, n. 2, p. 417-426, 2014.

MEDINA, N. H.; BRANCO, M. L. T.; SILVEIRA, M. A. G.; SANTOS, R. B. B. Dynamic distribution of potassium in sugarcane. **Journal of Environmental Radioactivity**, Canada, v. 126, n. 0, p. 172-175, 2013.

MELO, V. F.; CORRÊA, G. F.; MASCHIO, P. A.; RIBEIRO, A. N.; LIMA, V. C. Importancia das espécies minerais no potássio total da fração argila de solos do triangulo mineiro. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 807-819, 2003.

MIELNICZUK, J. Formas de potássio em solos do Brasil. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Campinas, v. 1, n. 2-3, p. 55-61, 1977.

MOURA FILHO, G.; ALBUQUERQUE, A. W.; MOURA, A. B.; SANTOS, A. C. I.; OLIVEIRA FILHO, M. S.; SILVA, L. C. Diagnose nutricional de variedades de cana-de-açúcar em argissolos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 11, p. 1102-1109, 2014.

MOZAMBANI, A. E.; PINTO, A. S.; SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M. História e morfologia da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. (Ed.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: Cap 2, 2006.

NASCIMENTO, M.; LAPIDO-LOUREIRO, F. E. D. V. O potássio na agricultura Brasileira: fontes e rotas alternativas. In: LAPIDO-LOUREIRO, F. E. D. V.; MELAMED, R.; FIGUEIREDO NETO, J. D. (Ed.). **Fertilizantes: agroindústria e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. Cap.9. p. 305-335.

NIEVES-CORDONES, M.; ALEMÁN, F.; MARTÍNEZ, V.; RUBIO, F. K⁺ uptake in plant roots. The systems involved, their regulation and parallels in other organisms. **Journal of Plant Physiology**, Germany, v. 171, p. 688-695, 2014.

NISHIYAMA, Y.; ALLAKHVERDIEV, S. I.; MURATA, N. A new paradigm for the action of reactive oxygen species in the photoinhibition of photosystem II. **Biochimica Biophysica Acta**, Shanghai, v. 1757, p. 742-749, 2006.

OLIVEIRA, A. C. **Interação da adubação nitrogenada e molíbdica em cana-de-açúcar.** (2012). 97 f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2012.

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

OLIVEIRA, E. C. A. D.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I. D.; FREIRE, M. B. G. D. S.; SIMÕES NETO, D. E.; SILVA, S. A. M. D. 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.

OLIVEIRA, F. M.; AGUILAR, P. B.; TEIXEIRA, M. F. F.; ASPIAZÚ, I.; MONÇAO, F. P.; ANTUNES, A. P. S. Características agrotecnológicas de cana-de-açúcar em diferentes épocas de supressão de irrigação e níveis de adubação. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 35, n. 3, p. 1587-1606, 2014a.

OLIVEIRA, M. W.; SILVA, V. S. G.; REIS, L. S.; OLIVEIRA, D. C.; SILVA, J. C. T. Produção e qualidade de três variedades de cana-de-açúcar cultivadas no nordeste de Minas Gerais. **Ciência Agrícola**, Rio Largo, v. 12, n. 1, p. 9-16, 2014b.

ORLANDO FILHO, J.; ZAMBELLO JÚNIOR, E.; RODELLA, A. A. Calibração de potássio no solo e recomendação de adubação para a cana-de-açúcar. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v. 97, n. 1, p. 18-24, 1981.

OSAKABE, Y.; ARINAGA, N.; UMEZAWA, T.; KATSURA, S.; NAGAMACHI, K.; TANAKA, H.; OHIRAKI, H.; YAMADA, K.; SEO, S.-U.; ABO, M.; YOSHIMURA, E.; SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. Osmotic Stress Responses and Plant Growth Controlled by Potassium Transporters in Arabidopsis. **The Plant Cell**, Los Angeles, v. 25, n. 2, p. 609-624, 2013.

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. 1137-1145, 2010.

PACHECO, C. M. **Análise proteômica associada à resposta à salinidade em raízes de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. (2012). 142 f. (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

PEREIRA, J. R.; FARIA, C. M. B.; MORGADO, L. B. Efeito de níveis e do resíduo de fósforo sobre a produtividade da cana-de-açúcar em vertissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 1, p. 43-48, 1995.

PETROBRAS. **Produção de petróleo e gás natural em outubro**. 2017. Disponível em:<<http://www.investidorpetrobras.com.br/pt/comunicados-e-fatos-relevantes/producao-de-petroleo-e-gas-natural-em-outubro-0>>. Acesso em: 18/01/2017.

PFLÜGER, R.; WIEDEMANN, R. Der Einfluß monovalenter Kationen auf die Nitratreduktion von *Spinacia oleracea* L. **Zeitschrift für Pflanzenphysiologie**, Germany, v. 85, n. 2, p. 125-133, 1977.

PÍPERAS, G. V.; CRESTE, J. E.; ECHER, F. R. Uso do DRIS na avaliação do estado nutricional da cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 56, n. 6, p. 818-825, 2009.

RAIJ, B VAN. Calibração de potássio trocável em solos para feijão, algodão e cana-de-açúcar. **Ciencia e Cultura**, Campinas, v. 26, n. 6, p. 575-576, 1974.

RAGAUSKAS, A. J.; WILLIAMS, C. K.; DAVISON, B. H.; BRITOVSEK, G.; CAIRNEY, J.; ECKERT, C. A.; FREDERICK, W. J.; HALLETT, J. P.; LEAK, D. J.; LIOTTA, C. L.; MIELENZ, J. R.; MURPHY, R.; TEMPLER, R.; TSCHAPLINSKI, T. The Path Forward for Biofuels and Biomaterials. **Science**, Washinton, v. 311, n. 5760, p. 484-489, 2006.

REIS JR, R. A.; MONNERAT, P. H. Diagnose nutricional da cana-de-açúcar em campos dos Goytacazes (RJ). **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 367-372, 2002.

REIS JR, R. A.; MONNERAT, P. H. DRIS norms validation for sugarcane crop. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 3, p. 379-385, 2003.

ROCHA, A. T.; OLIVEIRA, A. C.; RODRIGUES, Á. N.; LIRA JÚNIOR, M. A.; FREIRE, F. J. Emprego do gesso do Araripe na melhoria do ambiente radicular da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 3, n. 4, p. 307-312, 2008.

ROCHA, V. D. F.; SANTOS, L. A. D. L.; CABRAL, T. L. F.; MELO, F. D. A. D.; BARRETO, B. J. B. **Técnicas agrícolas sustentáveis para o cultivo da cana-de-açúcar**. Joao Pessoa, PB: ASPLAN, 2014.

RODELLA, A. A.; ZAMBELO JUNIOR, E.; ORLANDO FILHO, J. **Calibração das análises de fósforo e potássio do solo em cana-de-açúcar; 2ª aproximação**. São Paulo: STAB, v. 6, n. 28, p. 39-42, 1983.

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

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.

SALES, C. R. G.; RIBEIRO, R. B.; SILVEIRA, J. A. G.; MACHADO, E. C.; MARTINS, M. O.; LAGÔA, A. M. M. A. Superoxide dismutase and ascorbate peroxidase improve the recovery of photosynthesis in sugarcane plants subjected to water deficit and low substrate temperature. **Plant Physiology and Biochemistry**, French, v. 73, p. 326-336, 2013.

SANTOS, C. M.; ALMEIDA SILVA, M.; LIMA, G. P. P.; BORTOLHEIRO, F. P. D. A. P.; BRUNELLI, M. C.; HOLANDA, L. A.; OLIVER, R. Physiological Changes Associated with Antioxidant Enzymes in Response to Sugarcane Tolerance to Water Deficit and Rehydration. **Sugar Tech**, India, p. 1-14, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12355-014-0325-2>>.

SANTOS, E. F.; DONHA, R. M. A.; ARAÚJO, C. M. M.; LAVRES JÚNIOR, J.; CAMACHO, M. A. Faixas normais de nutrientes em cana-de-açúcar pelos métodos ChM, DRIS e CND e nível crítico pela distribuição normal reduzida. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 1651-1658, 2013.

SCHULTZ, N.; LIMA, E.; PEREIRA, M. G.; ZONTA, E. Efeito residual da adubação da cana-planta e da adubação nitrogenada e potássica na cana-soca colhidas com e sem a queima da palhada. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 811-820, 2010.

SILVA, I. R.; FURTINI NETO, A. E.; FERNANDES, L. A.; CURI, N.; VALE, F. R. Formas, relação quantidade/intensidade e biodisponibilidade de potássio em diferentes Latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, 2000.

SILVA, L. S.; POCOJESKI, E.; BRITZKE, D.; KAEFER, S.; GRIEBELER, G.; SANTOS, D. R. Disponibilidade de potássio a arroz irrigado por alagamento em solos de várzea. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiania, v. 45, n. 4, p. 379-387, 2015.

SOUZA, G. S. D.; SOUZA, Z. M. D.; SILVA, R. B. D.; ARAÚJO, F. S.; BARBOSA, R. S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana de açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, p. 603-612, 2012.

SOUZA, J. M.; BONOMO, R.; PIRES, F. R.; BONOMO, D. Z. Funções de pedotransferência para retenção de água e condutividade hidráulica em solo submetido a subsolagem. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 9, n. 4, p. 606-613, 2014.

SPRINGOB, G.; LEBERT, M.; VON REICHENBACH, H. G. Improved correlation between soil exchangeable K and plant K contents on a tissue water basis. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 172, n. 1, p. 163-165, 1995.

SUELTER, C. H. Enzymes activated by monovalent cations. **Science**, Washington, v. 168, p. 789-795, 1970.

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

TAKAHASHI, T.; IKEDA, Y.; NAKAMURA, H.; NANZIO, M. Efficiency of gypsum application to acid Andosols estimated using aluminum release rates and plant root growth. **Soil Science and Plant Nutrition**, Japan, v. 52, p. 584-592, 2006.

TOMEMORI, H.; HAMAMURA, K.; TANABE, K. Interactive effects of sodium and potassium on the growth and photosynthesis of spinach and komatsuna. **Plant Production Science**, Japan, v. 5, n. 4, p. 281-285, 2002.

TRANTAPHYLIDÈS, C.; KRISCHKE, M.; HOEBERICHTS, F. A.; KSAS, B.; GRESSER, G.; HAVAUX, M.; BREUSEGEM, F. V.; MUELLER, M. J. Singlet oxygen is the major reactive oxygen species involved in photooxidative damage to plants. **Plant Physiology**, United Kingdom, v. 148, p. 960-968, 2008.

UCHÔA, S. C. P.; ALVES JÚNIOR, H. O.; ALVES, J. M. A.; MELO, V. F.; FERREIRA, G. B. Resposta de seis variedades de cana-de-açúcar a doses de potássio em ecossistema de cerrado de Roraima. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, n. 4, p. 505-513, 2009.

VADEZ, V.; SOLTANI, A.; SINCLAIR, T. R. Modelling possible benefits of root related traits to enhance terminal drought adaptation of chickpea. **Field Crops Research**, United Kingdom, v. 137, n. 0, p. 108-115, 2012.

VALE, D. W.; PRADO, R. M.; AVALHAES, C. C.; HOJO, R. H. Omissão de macronutrientes na nutrição e no crescimento da cana-de-açúcar cultivada em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 6, n. 2, p. 189-196, 2011.

WAKHLOO, J. L.; GLASER, T. Interaction between Potassium and Nitrate in Intact Plants of *Lycopersicon esculentum* and its Effect upon Nitrogen Metabolism Including Protein Content of Leaves. **Zeitschrift für Pflanzenphysiologie**, Germany, v. 100, n. 1, p. 51-60, 1980.

WALKER, D. J.; BLACK, C. R.; MILLER, A. J. The Role of Cytosolic Potassium and pH in the Growth of Barley Roots. **Plant Physiology**, United Kingdom, v. 118, n. 3, p. 957-964, 1998.

WALKER, D. J.; LEIGH, R. A.; MILLER, A. J. Potassium homeostasis in vacuolate plant cells. **Plant Biology**, Germany, v. 93, p. 10510-10514, 1996.

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

WANG, N.; HUA, H.; EGRINYA ENEJI, A.; LI, Z.; DUAN, L.; TIAN, X. Genotypic variations in photosynthetic and physiological adjustment to potassium deficiency in cotton (*Gossypium hirsutum*). **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, Canada, v. 110, p. 1-8, 2012.

WATANABE, K.; FUKUZAWA, Y.; KAWASAKI, S. I.; UENO, M.; KAWAMITSU, Y. Effects of Potassium Chloride and Potassium Sulfate on Sucrose Concentration in Sugarcane Juice Under Pot Conditions. **Sugar Tech**, India, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12355-015-0392-z>>

WIETHOLTER, S. Bases teóricas e experimentais de fatores relacionados com a disponibilidade de potássio do solo às plantas usando o trigo como referência. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1011-1021, 2007.

ZENG, Q.; LING, Q.; FAN, L.; LI, Y.; HU, F.; CHEN, J.; HUANG, Z.; DENG, H.; LI, Q.; QI, Y. Transcriptome Profiling of Sugarcane Roots in Response to Low Potassium Stress. **PLoS ONE**, Germany, v. 10, n. 5, 2015.

ZHANG, Z.-Y.; QING-LIAN, W.; ZHAO-HU, L.; LIU-SHENG, D.; XIAO-LI, T. Effects of potassium deficiency on root growth of cotton seedlings and its physiological mechanisms. **Acta Agronomica Sinica**, China, v. 35, n. 4, p. 718-723, 2009.

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

**3. CAPÍTULO I: NUTRIÇÃO, FISIOLOGIA E PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA
DA CANA-DE-AÇÚCAR FERTILIZADA COM POTÁSSIO EM DIFERENTES
AMBIENTES DE PRODUÇÃO**

NUTRIÇÃO, FISIOLOGIA E PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA DA CANA-DE-AÇÚCAR FERTILIZADA COM POTÁSSIO EM DIFERENTES AMBIENTES DE PRODUÇÃO

Resumo

A adubação potássica na cana-de-açúcar consiste em um manejo de grande importância devido ao papel que esse nutriente desempenha sobre a fisiologia e bioquímica das plantas e, em especial, devido os solos brasileiros serem, relativamente, escassos nesse nutriente. A correta adubação também promove o balanço nutricional adequado e o aumento da produtividade da cana-de-açúcar. Este estudo teve por objetivo avaliar o efeito de doses de K_2O sobre a nutrição (teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Fe e Mn), aspectos fisiológicos (fotossíntese líquida, transpiração, condutância estomática e concentração interna de CO_2) e produtividade agrícola da cana-de-açúcar em cultivo de sequeiro. O experimento constou de dois campos experimentais: o primeiro foi implantado em ambiente com alto teor de K trocável no solo (ambiente A). O delineamento foi em blocos ao caso em arranjo fatorial (6×2) com 4 repetições, sendo seis doses de K_2O (0, 25, 50, 100, 200 e 250 $kg\ ha^{-1}$) e duas variedades de cana-de-açúcar (RB92579 e RB962962). O segundo experimento foi em ambiente com médio teor de K trocável no solo (ambiente B). O delineamento foi em blocos ao acaso com 4 repetições, sendo avaliado o efeito de seis doses de K_2O (0, 25, 50, 100, 200 e 250 $kg\ ha^{-1}$) e uma variedade de cana-de-açúcar (RB992506). A aplicação das doses de K_2O só promoveu efeito significativo sobre a nutrição e produtividade no ambiente B, que tinha médio teor de K trocável no solo. Observou-se aumento da produtividade, aumento do teor de K e S, e diminuição do teor de Mg foliar. No ambiente B, as doses de K_2O também promoveram aumento da transpiração e condutância estomática, enquanto que no ambiente A as doses só promoveram aumento da concentração interna de CO_2 . A adubação potássica é um manejo que deve ser empregado em ambientes com teores médios ou baixos teores de K no solo. A aplicação em ambientes com alto teor no solo não resulta em aumento da produtividade ou melhoria de qualidades fisiológicas da cana.

Palavras-chave: Adubação potássica. *Saccharum spp.*. Desbalanço nutricional. Trocas gasosas.

**NUTRITION, PHYSIOLOGY AND PRODUCTIVITY OF SUGARCANE
FERTILIZED WITH POTASSIUM IN DIFFERENT PRODUCTION
ENVIRONMENTS**

Abstract

Potassium fertilization in sugarcane consists in a management of great importance due to the role that this nutrient plays in the physiology and biochemistry of plants, and especially because Brazilian soils are relatively scarce in this nutrient. Correct fertilization also promotes adequate nutritional balance and increased productivity of sugarcane. The aim of this study was to evaluate the effect of K₂O rates on nutrition (N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Fe and Mn), physiological aspects (liquid photosynthesis, transpiration, stomatal conductance and Internal concentration of CO₂) and agricultural productivity of sugarcane in rainfed cultivation. The experiment consisted of two experimental fields: the first one was implanted in environment with high exchangeable K content in the soil (environment A). The design was in randomized blocks in factorial arrangement (6x2) with four replications, with six K₂O doses (0, 25, 50, 100, 200 and 250 kg ha⁻¹) and two sugarcane varieties (RB92579 And RB962962). The second experiment was in an environment with medium exchangeable K content in the soil (environment B). The experiment was performed in a randomized block design with four replicates. The effect of six K₂O doses (0, 25, 50, 100, 200 and 250 kg ha⁻¹) and a variety of sugarcane (RB992506) were evaluated. The application of K₂O rates had only a significant effect on nutrition and productivity in environment B, which had medium exchangeable K content in the soil. It was observed an increase in productivity, increase of K and S content, and decrease of foliar Mg content. In environment B, the rates of K₂O also promoted increased transpiration and stomatal conductance, whereas in environment A the rates only increased the internal CO₂ concentration. Potassium fertilization is a management that should be used in environments with medium or low levels of soil K. Application in environments with high soil content does not result in increased productivity or improvement of sugarcane physiological qualities.

Keywords: Potassium Fertilization. *Saccharum* spp. Nutritional Imbalance. Gas Exchange.

3.1. Introdução

A cana-de-açúcar desempenha papel de destaque na economia Brasileira. No biênio 2015/2016 a área plantada foi de 9.110,9 mil hectares com produtividade agrícola média de 76 Mg ha^{-1} e a produção total foi de 694,5 mil toneladas (CONAB, 2016). Estima-se que 15% de todo o adubo NPK consumido no Brasil é utilizado na cultura da cana-de-açúcar (CELLA; ROSSI, 2010), evidenciando a importância da adubação nessa cultura e, em especial, da adubação potássica, porque esse é o nutriente requerido em maiores quantidades pela cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar é cultivada em diversos tipos de solos e condições climáticas no Brasil (UCHÔA et al., 2009; CAIONE et al., 2011; MOURA FILHO et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2014; SIMÕES NETO et al., 2015). Adicionalmente, são utilizadas diversas variedades que possuem capacidades distintas de absorção e acúmulo de nutrientes (OLIVEIRA et al., 2011). No Nordeste, a cana-de-açúcar também é cultivada em diferentes condições edafoclimáticas e o censo varietal é muito diversificado. No entanto, as recomendações de adubação são generalistas.

Assim, o estado nutricional da cana-de-açúcar é avaliado por meio de faixas de referência oriundas de cultivos experimentais que pouco representam as peculiaridades regionais (REIS JR; MONNERAT, 2002). Adicionalmente, a avaliação do estado nutricional empregando-se referenciais generalizados podem fornecer conclusões nutricionais contraditórias, fazendo com que nutrientes que estejam em nível de suficiência em alguns modelos possam não estar em outros (SANTOS et al., 2013), tornando inexata a generalização padronizada do estado nutricional para todas as condições de cultivo.

Em estudos com fertilização potássica, a avaliação da interação do K com os outros nutrientes, principalmente Ca e Mg, é de grande importância devido à existência de antagonismo na absorção desses nutrientes pela planta. Em estudo com aplicação de quantidades crescentes de Ca foi observada redução do teor de Mg nas folhas de feijoeiro (SORATTO; CRUSCIOL, 2007). Em milho, também foi observada redução da absorção de K com o aumento dos teores de Ca e Mg trocáveis do solo (ANDREOTTI et al., 2000). Com isso, a investigação da interação da aplicação de quantidades crescentes de K com os demais nutrientes, principalmente os catiônicos, é de fundamental importância para que as quantidades recomendadas não causem redução na absorção de outros nutrientes e promovam desequilíbrios nutricionais.

Essa necessidade de investigação deve ser ainda mais ressaltada quando realizada em ambientes de produção diferentes. No Nordeste é comum encontrar regiões com solos apresentando teores adequados de K trocável, porém com restrições hídricas e outras com baixos teores de K trocável e com condições climáticas adequadas.

O K atua em funções bem definidas na planta. Ele é essencial para promover turgor para expansão celular e abertura e fechamento dos estômatos. O K é responsável pela ativação de diversos complexos enzimáticos e controle osmótico da célula (TAIZ; ZEIGER, 2004; MEURER, 2006).

Nutrição potássica adequada pode permitir que as plantas apresentem melhor homeostase de suas características fisiológicas, como condutância estomática (*g_s*), fotossíntese líquida (*A*) e transpiração (*E*) e, bioquímicas, como controle osmótico, metabolismo de carboidratos e proteínas (WANG et al., 2012; AHMAD et al., 2014; CAVALCANTE et al., 2015), tornando-as mais tolerantes a situações de estresses, como por exemplo, o déficit hídrico (KAFKAFI, 1990; WARAICH et al., 2011; WANG et al., 2013).

Portanto, estudos que possam avaliar o efeito do K aplicado em diferentes solos e condições climáticas em que se cultiva cana-de-açúcar no Nordeste podem contribuir para produzir conhecimento sobre o equilíbrio da nutrição com K e sua atuação nos aspectos fisiológicos das plantas, principalmente em ambientes com restrições hídricas recorrentes, como a zona da mata norte de Pernambuco.

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o estado nutricional, as características fisiológicas e a produtividade de cana-de-açúcar no primeiro ciclo de cultivo (cana planta) submetida a quantidades crescentes de K em diferentes ambientes de produção.

3.2. Material e métodos

3.2.1. Local dos ensaios de campo

Foram instalados dois campos experimentais: um no município de Caaporã, Paraíba, Brasil, com coordenadas geográficas 7°30'30.194324" de Latitude Sul e 34°52' 33.169375" de Longitude Oeste. O município está a 37 m acima do nível do mar e apresenta clima Am, segundo a classificação climática de Köppen-Geigerem; e outro no município de Carpina, Pernambuco, Brasil, com coordenadas geográficas 7°51'04" de Latitude Sul e 35°14'27" de

Longitude Oeste. O município está a 178 m acima do nível do mar e apresenta clima do tipo "AS" tropical chuvoso com verão seco, de acordo com a classificação de Köppen-Geigerem.

3.2.2. Definição dos ambientes de produção

Para definição dos ambientes de produção foram utilizados dois critérios: teor de K trocável do solo e as condições edafoclimáticas das regiões dos ensaios. Na distinção dos ambientes pelo teor de K trocável do solo, utilizou-se os critérios de interpretação do Manual de Recomendações de Adubação para o Estado de Pernambuco (IPA, 2008). Na distinção dos ambientes pelas condições edafoclimáticas utilizou-se a classe textural, teor de argila e precipitação pluvial.

Assim, definiu-se o ambiente A como o que apresentou teor elevado de K trocável do solo, classe textural média, teor de argila acima de 150 g kg⁻¹ e precipitação pluvial entre 1.000 e 1.500 mm. O ambiente B foi definido como o que apresentou teor médio de K trocável do solo, classe textural arenosa, teor de argila abaixo de 150 g kg⁻¹ e precipitação pluvial acima de 1.500 mm. Portanto, o ensaio instalado no município de Carpina, Pernambuco (EECAC) foi considerado ambiente A e o ensaio instalado no município de Caaporã, Paraíba (Destilaria Tabu) foi considerado ambiente B.

Nas áreas de cada ensaio foram coletadas cinco amostras de solo até 0,20 m de profundidade para compor uma amostra composta e realizada análises químicas para avaliação da fertilidade [pH_{água}, P, Na⁺, K⁺, Ca²⁺+Mg²⁺, Al³⁺, (H+Al)]. Foram também determinados os teores de Zn, Cu, Mn, Fe no ensaio do ambiente B e o teor de C orgânico total (COT) (DONAGEMA et al., 2011). Com os resultados dessas análises foram calculadas as capacidade de troca de cátions potencial (CTC_{potencial}) e efetiva (CTC_{efetiva}), a saturação por bases (V) e a saturação por alumínio (m).

Fisicamente, os solos dos dois ambientes foram caracterizados pela granulometria, densidade das partículas, densidade do solo e porosidade total (DONAGEMA et al., 2011) (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização química e física do solo nos diferentes ambientes dos ensaios de campo

Ambiente	pH _{água}	P	Na ⁺	K ⁺	(Ca ²⁺ +Mg ²⁺)	Al ³⁺	(H + Al)	CTC _{efetiva} ⁽¹⁾	CTC _{potencial} ⁽²⁾	V ⁽³⁾	m ⁽⁴⁾	
	(1:2,5)	mg dm ⁻³	cmolcdm ⁻³						%			
A	5,07	15,04	0,07	0,24	3,5	0,2	3,1	4,01	6,91	55,13	4,98	
B	4,70	8,00	0,02	0,12	2,1	0,2	2,3	2,44	4,54	49,33	8,19	
	Fe	Cu	Zn	Mn	Areia Total	Silte	Argila	COT ⁽⁵⁾	Classe Textural	Ds ⁽⁶⁾	Dp ⁽⁷⁾	Pt ⁽⁸⁾
	mg dm ⁻³				g kg ⁻¹					Mg m ⁻³	%	
A	nd	nd	nd	nd	770,4	51	178,6	7,71	Franco argilo arenosa	1,65	2,70	39
B	88,3	4,43	1,3	5,1	845,0	35	120,0	3,0	Areia franca	1,32	2,82	53

¹Capacidade de troca de cátions efetiva; ²Capacidade de troca de cátions potencial; ³Saturação por bases; ⁴Saturação por alumínio; ⁵Carbono orgânico total; ⁶Densidade do solo; ⁷Densidade das partículas; ⁸Porosidade total

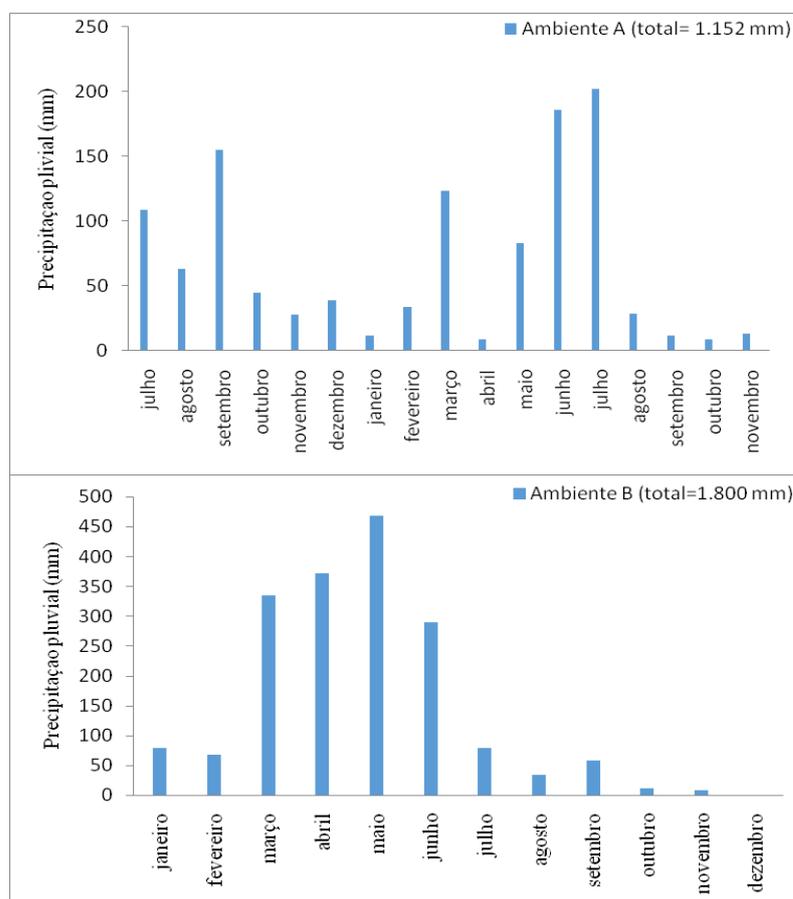


Figura 1. Precipitação pluviométrica durante os experimentos nos ambientes A e B

A precipitação pluviométrica durante o ensaio experimental foi de 1.152 mm no ambiente A e 1.800 mm no ambiente B (Figura 1).

3.2.3. Ensaio experimentais

O experimento no ambiente A foi implantando em blocos ao acaso em arranjo fatorial, sendo utilizadas duas variedades de cana-de-açúcar (RB92579 e RB962962) e aplicadas seis doses de K (0; 21; 41,5; 83; 166; e 207,5) que corresponderam a aproximadamente as seguintes doses de K_2O (0; 25; 50; 100; 200; e 250 $kg\ ha^{-1}$) com quatro repetições, totalizando 48 parcelas experimentais.

As variedades foram escolhidas em razão da tolerância ao estresse hídrico da RB962962 e ao histórico de pouca tolerância da RB92579, porém com rápida recuperação após o estresse (RIDESA, 2010).

O experimento no ambiente B foi implantado em blocos ao acaso, com quatro repetições, totalizando 24 unidades experimentais, porque foi utilizada apenas a variedade RB992506 que é uma das variedades mais recentemente liberadas (OLIVEIRA, 2015). Nesse ensaio foram aplicadas as mesmas doses de K utilizadas no ensaio do ambiente A.

As unidades experimentais do ensaio do ambiente A compreenderam sete linhas de plantio com 10,0 m de comprimento, com espaçamento nas entrelinhas de 1,0 m, correspondendo a uma área total de 70 m^2 . Para a área útil foi eliminado 1,0 m de cada lado da parcela, totalizando uma área útil de 36,0 m^2 .

As parcelas do experimento do ambiente B compreenderam seis linhas de plantio com 10,0 m de comprimento com espaçamento de 1,5 x 0,9 m, correspondendo a uma área total de 72 m^2 . A área útil correspondeu às quatro linhas centrais com exclusão de 1,0 m de cada lado da parcela, totalizando 37,6 m^2 de área útil.

O preparo do solo foi realizado com controle químico de plantas espontâneas, subsolagem, aragem e gradagem e, posterior, sulcagem do solo. O plantio do experimento do ambiente A foi realizado em 30 de Junho de 2014, sendo colhido em Novembro de 2015 (cana de ano e meio) e no ensaio do ambiente B foi realizado em 20 de Janeiro de 2016 e colhido em Dezembro (cana de ano). A cana-de-açúcar foi plantada distribuindo-se colmos no sulco de modo a coincidir a extremidade de um com a base do outro. Foram distribuídos aproximadamente 18 $Mg\ ha^{-1}$ de colmos, com posterior seccionamento de modo a se obter, em média, 24 gemas por metro linear.

O solo do ensaio do experimento no ambiente A foi corrigido, utilizando-se 1,2 $Mg\ ha^{-1}$ de calcário dolomítico, com PRNT de 85%. A necessidade de calagem foi calculada pelo

método da saturação por bases, elevando-se a saturação para 70% (IPA, 2008). O corretivo foi aplicado a lanço em área total sem incorporação. Foi realizada adubação de fundação no sulco de plantio com 40 kg ha⁻¹ de N na forma de uréia (IPA, 2008) e 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ com superfosfato triplo (SIMÕES NETO et al., 2015). O K foi aplicado conforme a diferenciação dos tratamentos, utilizando-se como fonte o cloreto de potássio. Não houve aplicação de micronutrientes e nem defensivos químicos no plantio.

O solo do ensaio do experimento no ambiente B também foi corrigido, utilizando-se 1,1 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico, com PRNT de 85%. A necessidade de calagem foi calculada pelo método da saturação por bases (IPA, 2008), elevando-se a saturação para 70%. Foi aplicado 1,0 Mg ha⁻¹ de gesso mineral na área experimental baseada na exportação de Ca pela cultura para quatro cultivos sucessivos (OLIVEIRA et al., 2010). Os corretivos foram aplicados a lanço em área total sem incorporação.

Foi realizada adubação de fundação no sulco de plantio com 60 kg ha⁻¹ de N na forma de uréia + 200 g ha⁻¹ de Mo (OLIVEIRA, 2012) e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ com superfosfato triplo (SIMÕES NETO et al., 2015). O K foi aplicado conforme a diferenciação dos tratamentos, utilizando-se como fonte o cloreto de potássio. Foram aplicados também 2,6 kg ha⁻¹ de Cu, 4 kg ha⁻¹ de Zn, 5,2 kg ha⁻¹ de Mn na forma de sulfato (IPA, 2008) e 2,0 L ha⁻¹ de B, conforme manejo de adubação utilizado pela empresa. No plantio também foram aplicados fungicida (0,5 L ha⁻¹), nematicida (5 L ha⁻¹) e cupinicida (0,2 kg ha⁻¹) sobre os colmos, antes do fechamento dos sulcos de plantio.

3.2.4. Variáveis mensuradas

3.2.4.1. Estado nutricional das plantas

Aos nove meses após o plantio no ensaio do ambiente A e aos quatro meses no ensaio do ambiente B foram coletados o terço médio de 15 folhas índices ou diagnósticas (+1) por parcela, para determinação dos nutrientes N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu e Zn. Os diferentes períodos de coleta de folhas nos dois ambientes foi para coincidir com o início do período de máximo perfilhamento da cana-de-açúcar, ou seja, no início dos maiores índices pluviométricos (Figura 1).

As folhas foram secadas em estufa de ventilação forçada de ar a 65 °C e trituradas em moinho tipo Willey. O N foi determinado por titulação após digestão em ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio e destilado pelo método Kjeldahl. Os nutrientes P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu e Zn foram digeridos em solução nitroperclórica, sendo o P determinado por colorimetria e o S por turbidimetria, ambos em espectrofotômetro. O K foi determinado em espectrofotômetro de chama e Ca, Mg, Fe, Mn, Cu e Zn foram determinados em espectrofotômetro de absorção atômica (EMBRAPA, 2009).

3.2.4.2. Variáveis fisiológicas

Aos sete meses após o plantio no ensaio do ambiente A (período de déficit hídrico para a cana de ano e meio, que correspondeu ao mês de janeiro/2015) e um mês no ensaio do ambiente B (início do crescimento e final do período de déficit hídrico para a cana de ano, que correspondeu ao mês de fevereiro/2016) foram avaliadas em um analisador de gases por infravermelho (IRGA) (LI-6400xt LI-COR bioscience®) as seguintes variáveis fisiológicas: fotossíntese líquida (taxa de assimilação de CO₂) (A), condutância estomática (g_s), transpiração (E), concentração de CO₂ intracelular (C_i). As avaliações foram realizadas no período da manhã entre as 08 e 11h.

3.2.4.3. Produtividade agrícola

A produtividade agrícola foi avaliada colhendo-se todas as plantas em cada parcela útil nos ensaios dos ambientes A e B. Após a colheita as plantas foram pesadas em dinamômetro e seus valores estimados para hectare (10.000 m²).

3.2.4.4. Procedimentos estatísticos

Os dados das variáveis do experimento no ambiente A foram submetidos à análise de variância (ANAVA) e quando os efeitos principais e, ou, as interações foram significativas foi realizada análise de regressão (p<0,05). No ensaio do ambiente B, como o efeito principal era apenas quantidades crescentes de K, foi realizado regressão (p<0,05). Os coeficientes dos parâmetros da regressão foram testados, utilizando-se o teste t (p<0,05). Foi utilizado o software SISVAR versão 5.8 (Ferreira, 2008).

3.3. Resultados e discussão

3.3.1. Estado nutricional e produtividade agrícola

No ensaio implantado no ambiente A, as quantidades de K aplicadas não promoveram efeitos significativos ($p < 0,05$), nem nos teores dos nutrientes nas folhas da cana-de-açúcar, inclusive K, e nem na produtividade agrícola (Tabela 2 e 3). Isso pode ter sido por causa do elevado teor inicial de K trocável do solo (Tabela 1), que estava acima do nível crítico recomendado para o K trocável no Estado de Pernambuco (IPA, 2008). Contudo, houve diferenças significativas entre as variedades para os teores foliares de N e Mg (Tabela 2) e Mn e Zn (Tabela 3), sendo que para os teores de N o efeito das quantidades aplicadas de K variou, dependendo da variedade, porque a interação foi significativa estatisticamente (Tabela 2). Essa diferença varietal pode ser função das variedades de cana-de-açúcar possuírem capacidade diferenciada para extração e acúmulo de nutrientes do solo (OLIVEIRA et al., 2010).

A curva de resposta do N em função das doses de K_2O foi quadrática na variedade RB92579 e linear na RB962962 (Figura 2). Quantidades crescentes de K até 100 kg ha^{-1} de K_2O promoveram decréscimo do teor de N foliar na variedade RB92579, enquanto que quantidades subsequentes promoveram aumento do teor de N. Na variedade RB962962 não houve efeito do K aplicado.

Tabela 2. Teores foliares dos nutrientes nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre em função da aplicação de quantidades crescentes de potássio em diferentes variedades de cana-de-açúcar aos nove meses após o plantio no ambiente A de produção, teores de referência, análise da variância, regressão, média e coeficiente de variação dos dados

Potássio (K ₂ O)	Teores foliares dos nutrientes											
	N		P		K		Ca		Mg		S	
	579 ⁽¹⁾	2962 ⁽²⁾	579	2962	579	2962	579	2962	579	2962	579	2962
-----kg ha ⁻¹	-----gkg ⁻¹											
0	19,20	14,17	2,29	1,45	17,31	11,66	2,81	2,56	2,30	3,14	2,64	2,62
25	18,07	16,21	1,58	1,51	17,61	12,80	2,08	2,34	1,57	2,80	2,38	1,98
50	16,74	15,11	1,67	1,58	19,81	14,51	2,08	2,11	1,51	2,83	2,40	3,03
100	17,27	16,54	1,58	1,71	17,02	15,07	2,40	2,27	1,90	2,95	2,33	2,03
200	18,22	15,47	1,58	1,62	18,97	15,35	1,92	2,35	1,49	2,99	2,49	2,55
250	19,09	15,48	1,58	1,59	17,53	16,01	1,99	2,25	1,79	2,73	2,20	2,31
Média	18,10	15,49	1,71	1,57	19,49a	14,23b	2,21	2,31	1,76b	2,91a	2,64	2,62
Referência I ⁽³⁾	18-25		1,5-3,0		10-16		2-8		1,0-3,0		1,5-3,0	
Referência II ⁽⁴⁾	20-23		2,0-2,5		9-15		9,5-11,5		2,0-4,5		1,5-3,0	
	F análise da variância											
Dose de K	0,97ns		0,62ns		0,41ns		1,82ns		2,47ns		1,05ns	
Variedade	43,29*		1,32ns		11,50*		0,55ns		112,22*		0,004ns	
Dose xVariedade	2,55*		1,51ns		1,53ns		0,61ns		0,88ns		0,61ns	
	F regressão											
Regressão Linear	0,62ns	0,37ns	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Regressão Quadrática	7,22*	2,89ns	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
C.V. (%) ⁽⁵⁾	8,16		24,86		31,81		20,75		16,08		27,22	

⁽¹⁾Variedade RB 92579; ⁽²⁾Variedade RB 962962; ⁽³⁾EMBRAPA (2009); ⁽⁴⁾Cantarutti et al. (2007); ⁽⁵⁾Coefficiente de variação = Desvio padrão/Média x 100

Letras iguais na linha não diferem pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade

*Significativo a 5% de probabilidade. nsNão significativo

Tabela 3. Teor foliar dos nutrientes manganês, zinco, cobre, ferro e produtividade agrícola em função da aplicação de quantidades crescentes de potássio em diferentes variedades de cana-de-açúcar aos nove meses após o plantio no ambiente A de produção, teores de referência, análise da variância, regressão, média e coeficiente de variação dos dados

Potássio (K ₂ O)	Teores foliares dos nutrientes								Produtividade	
	Mn		Zn		Cu		Fe		579	2962
	579 ⁽¹⁾	2962 ⁽²⁾	579	2962	579	2962	579	2962		
kg ha ⁻¹	mg kg ⁻¹								Mg ha ⁻¹	
0	97,5	106,0	36,4	26,1	48,0	26,6	98,2	130,3	76,24	80
25	62,9	92,2	32,5	28,0	37,7	64,6	121,3	127,6	80,41	81,66
50	61,9	80,5	36,5	24,5	54,3	26,2	123,8	108,3	77,08	78,33
100	63,9	132,3	35,2	27,4	40,8	52,6	141,4	123,1	80,41	92,91
200	88,1	113,2	38,7	37,9	34,3	55,0	136,8	120,9	79,58	88,75
250	45,1	117,7	35,5	27,1	33,0	54,8	96,2	129,0	88,33	84,58
Média	69,9 b	107,0a	35,8a	28,5b	41,4	46,6	119,6	123,2	80,34	84,37
Referência I ⁽³⁾	25-250		10,0-50,0		6,0-15,0		40-250			
Referência II ⁽⁴⁾	50-250		25-50		8,0-10		100-500			
	F análise da variância									
Dose de K	1,52ns		0,69ns		0,29ns		0,46ns		1,37ns	
Variedade	17,73*		5,93*		0,52ns		0,12ns		2,09ns	
Dose x Variedade	1,54ns		0,30ns		1,78ns		0,98ns		0,75ns	
C.V. (%) ⁽⁵⁾	34,46		32,32		57,32		28,28		11,70	

⁽¹⁾Variedade RB 92579; ⁽²⁾Variedade RB 962962; ⁽³⁾EMBRAPA (2009); ⁽⁴⁾Cantarutti et al. (2007); ⁽⁵⁾Coefficiente de variação = Desvio padrão/Média x 100.

Letras iguais na linha não diferem pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

*Significativo a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo.

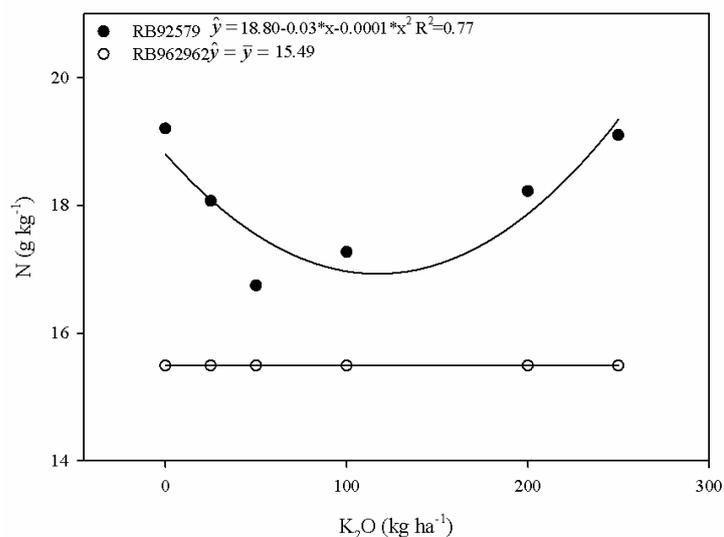


Figura 2. Teor de nitrogênio em folhas de cana-de-açúcar nas variedades RB92579 e RB962962 em função da aplicação de potássio no ambiente A de produção

Os teores médios dos nutrientes na folha +1 apresentaram valores dentro das faixas de suficiência relatada na literatura (EMBRAPA, 2009), exceto o N na variedade RB962962, que apresentou teor inferior a faixa adequada e Zn e Cu que em ambas as variedades tiveram valores superiores às faixas adequadas estabelecidas pela EMBRAPA (2009) (Tabela 2 e 3). Em relação aos teores relatados por Cantarutti et al. (2007), ambas variedades nesse estudo apresentaram valores médios de N, P e Ca inferiores aos descritos por esses autores (Tabela 2). As variedades RB92579 e RB962962 também apresentaram teor médio de Mg e K inferior a faixa adequada, respectivamente. Os teores de Mn, Zn e Fe foram adequados para ambas variedades e o teor de Cu foi superior ao estabelecido como teor adequado (Tabela 3).

O estado nutricional e a produtividade da cana-de-açúcar no ambiente B de produção dependeu das quantidades crescentes aplicadas de K, tendo a regressão apresentado efeito significativo ($p < 0,05$) para os teores foliares de K, Mg, S e produtividade agrícola (Tabela 4).

Tabela 4. Teores foliares dos nutrientes nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, manganês, zinco, cobre, ferro e produtividade agrícola em função da aplicação de quantidades crescentes de potássio na variedade RB992506 de cana-de-açúcar aos quatro meses após o plantio no ambiente B de produção, teores de referência, análise da variância, regressão, média e coeficiente de variação dos dados

Potássio (K ₂ O)	Teores foliares dos nutrientes										Produtividade
	N	P	K	Ca	Mg	S	Mn	Zn	Cu	Fe	
kg ha ⁻¹	g kg ⁻¹					mgkg ⁻¹					Mg ha ⁻¹
0	18,0	1,4	9,3	4,4	1,6	4,68	32,3	18,7	77,0	9,1	103,71
25	17,6	1,3	9,1	3,9	1,3	2,64	32,2	16,5	78,6	8,8	105,57
50	17,5	1,4	9,8	4,0	1,5	3,45	26,5	17,2	120,7	9,8	108,08
100	17,9	1,5	10,4	3,9	1,2	3,87	37,3	20,1	56,8	9,4	115,72
200	18,2	1,4	10,1	4,2	1,2	4,25	28,1	22,3	85,5	9,1	113,43
250	18,8	1,4	11,2	3,8	1,2	6,55	40,2	22,1	90,7	8,8	108,28
Referência I ⁽¹⁾	18-25	1,5-3,0	10-16	2-8	1,0-3,0	1,5-3,0	25-250	10-50	6-15	40-250	
Referência II ⁽²⁾	20-23	2,0-2,5	9-15	9,5-11,5	2,0-4,5	1,5-3,0	50-250	25-50	8-10	100-500	
Regressão											
Regressão Linear	4,23ns	0,04ns	12,07*	0,57ns	6,67*	6,62*	1,43ns	3,32ns	0,29ns	0,01ns	1,91ns
Regressão Quadrática	1,13ns	0,88ns	0,07ns	0,15ns	1,75ns	4,02ns	0,64ns	0,00ns	1,07ns	0,13ns	5,05*
C.V. (%) ⁽³⁾	4,84	6,18	8,45	14,62	16,05	37,66	23,84	27,31	10,05	29,03	6,86

(1) EMBRAPA (2009); (2) Cantarutti et al. (2007); (3) Coeficiente de variação = Desvio padrão/Média x 100.

. *Significativo a 5% de probabilidade. ns Não significativo

O aumento dos teores foliares de K pela aplicação de quantidades crescentes desse nutriente ao solo como constatado nesse estudo (Figura 3A) tem sido relatado na literatura (UCHÔA et al., 2009; ASHRAF et al., 2010; CAIONE et al., 2011).

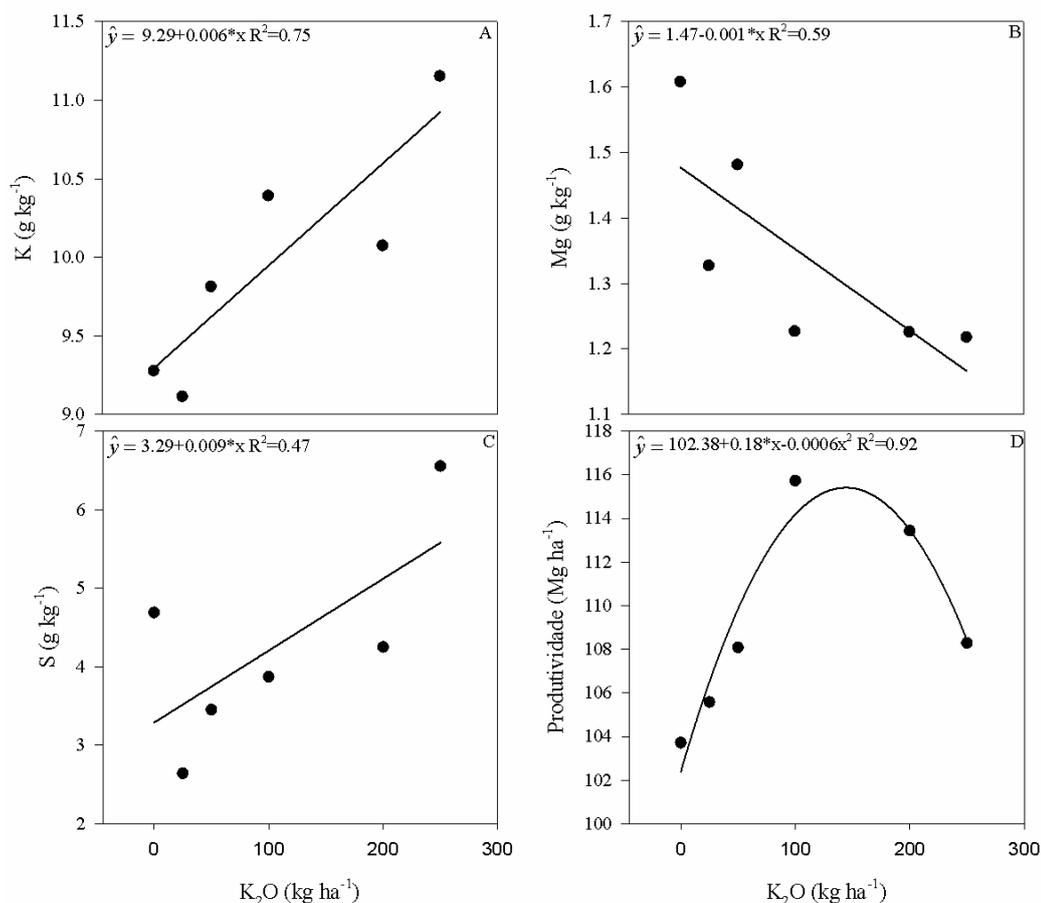


Figura 3. Teor de potássio (A), magnésio (B) e enxofre (C) em folhas de cana-de-açúcar e produtividade agrícola (D) na variedade RB992506 em função da aplicação de potássio no ambiente B de produção

No entanto, o aumento dos teores de K nas folhas da cana-de-açúcar foi acompanhado pela redução dos teores de Mg (Figura 3B) e pelo aumento dos teores de S (Figura 3C). K e Mg são nutrientes catiônicos que competem pelos sítios de adsorção no solo e absorção na planta, sendo que o excesso de um pode afetar a absorção do outro, devido à redução da atividade do elemento com menor concentração na solução do solo (ALLEONI et al., 2009) ou sua lixiviação para camadas mais profundas do solo, como observado para Mg trocável em solo adubado com K (ERNANI et al., 2007b) ou em solo corrigido com gesso (ZAMBROSI et al., 2007; SORATTO; CRUSCIOL, 2008) e, conseqüentemente, redução da sua absorção pela planta. Esse comportamento foi observado por ANDREOTTI et al. (2000), que constataram redução na absorção K pelo milho, devido ao aumento dos teores de Ca e Mg trocáveis do solo.

O aumento dos teores de S nas folhas de cana-de-açúcar (Figura 3C) devido às quantidades crescentes de K aplicadas pode ser resultante da maior atividade de enzimas responsáveis pelo metabolismo de proteínas, porque o K é um nutriente ativador de diversos

complexos enzimáticos, inclusive enzimas do metabolismo de proteínas e aminoácidos (MEURER, 2006; ERNANI et al., 2007a; ROSETTO et al., 2008) e o S é um elemento precursor de aminoácidos, inclusive dos aminoácidos essenciais cistina, cisteína e metionina (DECHEN; NACHTIGALL, 2007).

A produtividade agrícola apresentou aumento quadrático em relação às quantidades de K aplicadas (Figura 3D). Ao se realizar a derivada de primeiro grau da equação de polinômio de segundo grau obteve-se dose de máxima de 150 kg ha⁻¹. Até esta dose houve aumento da produtividade e a partir desta dose houve redução. O decréscimo na produtividade devido às quantidades crescentes de K₂O aplicadas (Figura 3D), apesar do aumento linear no teor foliar desse nutriente (Figura 3A), pode não ser devido à toxidez pelo aumento do teor de K nas folhas (MEURER, 2006), mas sim devido à elevação da condutividade elétrica do solo (CE) na aplicação das maiores quantidades de K₂O. Dias e Blanco (2010) constataram que o nível de tolerância à salinidade para a cana-de-açúcar foi de 1,7 dS m⁻¹. Pode ser que nas maiores doses de K aplicadas a CE do extrato de saturação do solo, tenha atingido esse nível e reduzido a produtividade agrícola.

A comparação do estado nutricional da variedade RB992506 nesse ambiente de produção com as referências da literatura também mostraram diferenças contrastantes (Tabela 4). Os nutrientes N, P, K, Ca, Mg, Mn e Zn mostraram-se adequados, Fe foi baixo e S e Cu altos em comparação com os valores de referência estabelecidos pela EMBRAPA (2009). Em relação às faixas de referência relatadas por Cantarutti et al. (2007) somente o teor de K foi considerado adequado. Os teores de N, P, Ca, Mg, Mn, Zn e Fe foram baixos e os teores de S e Cu altos.

3.3.2. Variáveis fisiológicas

A aplicação de K₂O não alterou os parâmetros fisiológicos no experimento conduzido no ambiente A (Tabela 5), mas houve diferença ($p < 0,05$) entre variedades para condutância estomática (g_s) e transpiração (E), independente. Para concentração de CO₂ intracelular (C_i) e fotossíntese líquida (A), as variedades se comportaram diferentemente e dependeram da dose de K₂O aplicada. Os dados de fotossíntese líquida não se ajustaram a nenhum modelo significativo de regressão ($p > 0,05$) (Tabela 5).

Tabela 5. Fotossíntese líquida, condutância estomática, transpiração e concentração de CO₂ intracelular em função da aplicação de quantidades crescentes de potássio em diferentes variedades de cana-de-açúcar aos sete meses após o plantio no ambiente A de produção, análise da variância, regressão, média e coeficiente de variação dos dados

Potássio (K ₂ O)	Variáveis fisiológicas							
	Fotossíntese líquida (A)		Condutância estomática (g _s)		Transpiração (E)		Concentração de CO ₂ intracelular (C _i)	
	579 ⁽¹⁾	2962 ⁽²⁾	579	2962	579	2962	579	2962
kg ha ⁻¹	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹		mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹		mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹		μmol CO ₂ mol ⁻¹	
0	14,15Aa	16,18Aa	0,08	0,08	80,28	41,04	2,17	2,19
25	20,32Aa	13,70Ab	0,12	0,07	74,91	51,10	3,0	1,91
50	12,85Aa	17,87Aa	0,08	0,09	72,90	43,72	2,29	2,45
100	15,90Aa	11,20Aa	0,08	0,05	54,85	55,19	2,26	1,60
200	16,94Aa	12,55Aa	0,09	0,07	60,21	66,19	2,56	1,89
250	14,90Aa	16,68Aa	0,08	0,09	72,80	55,18	2,36	2,44
Média	15,84	14,70	0,09a	0,07b	69,32a	52,07b	2,44	2,08
F análise da variância								
Dose de K	0,83ns		1,13ns		1,17ns		0,75ns	
Variedade	1,25ns		6,85*		6,16*		27,81*	
Dose x Variedade	3,50*		2,47ns		2,10ns		4,72*	
F regressão								
Regressão Linear	0,015ns	0,13ns	--	--	--	--	2,67ns	7,43*
Regressão Quadrática	0,087ns	4,06ns	--	--	--	--	10,29*	1,90ns
C.V. (%) ⁽³⁾	23,20		24,74		18,67		22,19	

⁽¹⁾Variedade RB 92579; ⁽²⁾Variedade RB 962962; ⁽³⁾Coeficiente de variação = Desvio padrão/Média x 100

Letras iguais na linha não diferem pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade

*Significativo a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo

Diferenças entre parâmetros fisiológicos em variedades de cana-de-açúcar são relatadas na literatura e indicam capacidades fisiológicas distintas para superar estresses bióticos (SANTOS et al., 2014). Nesse estudo a variedade RB92579 apresentou maior condutância estomática e transpiração do que a variedade RB962962 (Tabela 5). A variedade RB962962 é considerada tolerante à seca, enquanto que a RB92579 apresenta boa capacidade de recuperação após períodos curtos de estresse (RIDESA, 2010) e, apesar de não ter ocorrido diferenças significativas ($p > 0,05$) entre as variedades para a produtividade agrícola, a variedade RB962962 apresentou maior produtividade do que a RB92579 (Tabela 3). Desta

forma, a variedade RB962962 pode ser mais eficiente na manutenção do status hídrico por meio da melhor regulação da condutância estomática e transpiração do que a RB92579 e, assim, produziu mais em condição de sequeiro do que essa variedade.

A concentração de CO₂ intracelular apresentou efeito significativo ($p < 0,05$) para a interação dose de K₂O aplicada e variedade (Tabela 5). A variedade RB92579 apresentou efeito quadrático para concentração de CO₂ intracelular, sendo observado decréscimo da concentração até a dose de 100 kg ha⁻¹ de K₂O e aumento após essa dose. Enquanto que a variedade RB962962 apresentou aumento linear da concentração de CO₂ com o aumento da dose de K₂O (Figura 4).

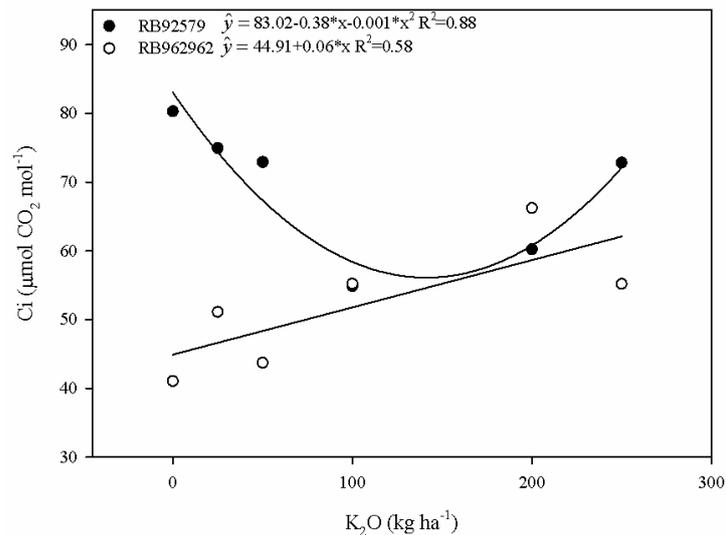


Figura 4. Concentração de CO₂ intracelular (Ci) em folhas de cana-de-açúcar nas variedades RB92579 e RB962962 em função da aplicação de potássio no ambiente A de produção

O K é um nutriente responsável pela ativação da enzima RUBISCO que tem a função de fixação do CO₂ atmosférico para a fotossíntese (WARAICH et al., 2011). Plantas com alta eficiência na utilização de K possuem maior capacidade de assimilação de CO₂ do que plantas menos eficiente (WANG et al., 2012). Nesse estudo constatou-se que a variedade RB92579 apresentou maior capacidade de absorção de K do que a RB962962 (Tabela 2). Este fato pode indicar que sob condições de disponibilidade limitada de K trocável do solo, a variedade RB92579 pode ser mais adequada para plantio do que a RB962962, porque apresentou maior capacidade de absorção de K trocável do solo de modo que a concentração interna de CO₂

celular não seja comprometida (Tabela 5). Contudo, quando houver fertilização com K, ou o solo tiver quantidade suficiente, a variedade RB962962 pode ser também recomendada.

Trinta dias após o plantio foi realizada análise fisiológica no experimento instalado no ambiente B. As análises de regressão demonstraram efeito linear significativo ($p < 0,05$) entre as doses aplicadas para condutância estomática e transpiração (Tabela 6).

Tabela 6. Fotossíntese líquida, condutância estomática, transpiração e concentração de CO₂ intracelular em função da aplicação de quantidades crescentes de potássio na variedade RB992506 de cana-de-açúcar um mês após o plantio no ambiente B de produção, análise da regressão, média e coeficiente de variação dos dados

Potássio (K ₂ O)	Variáveis fisiológicas			
	Fotossíntese líquida (A)	Condutância estomática (g _s)	Transpiração (E)	Concentração de CO ₂ intracelular (C _i)
kg ha ⁻¹	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹	mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹	μmol CO ₂ mol ⁻¹
0	38,81	0,26	82,42	7,27
25	33,11	0,20	73,21	5,93
50	37,56	0,25	80,73	6,85
100	36,71	0,29	123,15	7,83
200	35,80	0,27	110,26	7,44
250	40,24	0,31	107,40	8,17
			F regressão	
Regressão Linear	0,38ns	5,76*	6,30*	2,54ns
Regressão Quadrática	0,59ns	0,015ns	0,002ns	1,09ns
C.V. (%) ⁽¹⁾	17,45	17,95	40,34	13,38

⁽¹⁾Coefficiente de variação = Desvio padrão/média x 100

*Significativo a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo

A condutância estomática é um parâmetro fisiológico que se refere à taxa das trocas gasosas (CO₂ e vapor d'água) que ocorrem entre a folha das plantas e a atmosfera (VICO et al., 2013), sendo estritamente correlacionada com a transpiração da planta. Além disso, a condutância estomática é um parâmetro que está mais fortemente relacionado ao status hídrico do solo, porque a regulação das trocas gasosas é dependente do funcionamento dos estômatos que regulam sua abertura e fechamento de acordo com a umidade do solo (TAIZ; ZEIGER, 2004).

A aplicação das doses de K promoveu aumento significativo e linear ($p < 0,05$) da condutância estomática e da transpiração (Figura 5). O K^+ é o principal íon responsável pelo ajuste osmótico nas plantas (WANG et al., 2013) e concentrações adequadas desse nutriente promovem regulação mais eficiente das trocas gasosas nas plantas (FOURNIER et al., 2005; BENLLOCH-GONZÁLEZ et al., 2008; BENLLOCH-GONZÁLEZ et al., 2010). Em estudo com algodão sob deficiência de K foi observado menores valores da condutância estomática no tratamento com deficiência do que no controle (WANG et al., 2012). Em cana-de-açúcar também foi observado que a deficiência de K promoveu redução da condutância estomática (CAVALCANTE et al., 2015).

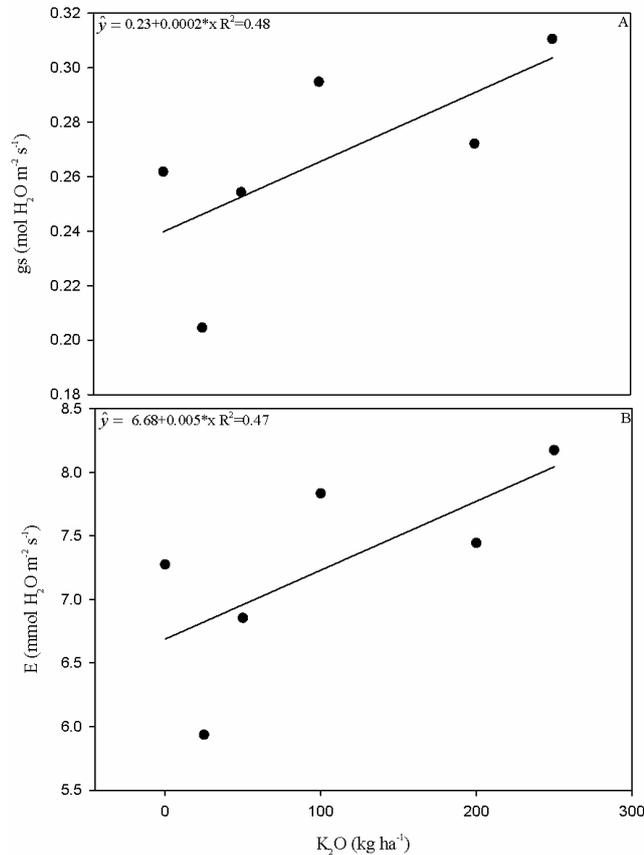


Figura 5. Condutância estomática (gs) (A) e transpiração (E) (B) em folhas de cana-de-açúcar na variedade RB992506 em função da aplicação de potássio no ambiente B de produção

A manutenção do status hídrico celular é uma importante função do K (WANG et al., 2013). Plantas adequadamente supridas com esse nutriente podem manter, ou mesmo, propiciar maiores taxas de transpiração, mesmo em condições de reduzida disponibilidade

hídrica, sem que ocorra prejuízo a hidratação da planta (FANAEI et al., 2009), assim como observado nesse estudo (Tabela 6 e Figura 5).

3.4. Conclusões

De forma geral, a aplicação da adubação potássica só proporcionou efeito significativo sobre a produtividade, nutrição e fisiologia da cana-de-açúcar no ambiente com teor médio de K trocável no solo (Ambiente B). No ambiente com alto teor de K trocável (Ambiente A), a adubação potássica não promoveu aumento na produtividade e na nutrição das plantas. No ambiente B, a dose de 150 kg ha⁻¹ de K₂O promoveu aumento de 12% na produtividade de colmos em relação ao controle, e nenhum aumento significativo no ambiente A. Adicionalmente, observou-se que somente para o ambiente B, as doses de K₂O aplicadas promoveram aumento dos teores de K nas folhas. No Ambiente B, o aumento das doses de K promoveram aumento da condutância estomática e da transpiração enquanto que no Ambiente A as doses de K₂O só promoveram aumento da concentração interna de CO₂. Desta forma, não é recomendável a aplicação de adubação potássica em ambiente com elevados teores de K trocável no solo visto não ocorrer aumento da produtividade da cana ou melhoria nas características nutricionais ou fisiológicas.

Referências bibliográficas

AHMAD, P.; ASHRAF, M.; HAKEEM, K. R.; AZOOZ, M.; RASOOL, S.; CHANDNA, R.; AKRAM, N. A. Potassium starvation-induced oxidative stress and antioxidant defense response in *Brassica juncea*. **Journal of Plant Interactions**, Turin, v. 9, n. 1, p. 1-9, 2014.

ALLEONI, L. R. F.; MELLO, J. W. V.; ROCHA, W. S. D. Eletroquímica, adsorção e troca iônica no solo In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Ed.). **Química e mineralogia do solo: Parte II**. Viçosa, MG: SBCS, 2009. Cap.XII. p. 69-129.

ANDREOTTI, M.; SOUZA, E. C. A.; CRUSCIO, C. A. C.; RODRIGUES, J. D.; BÜLL, L. T. Produção de matéria seca e absorção de nutrientes pelo milho em razão da saturação por bases e da adubação potássica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 12, p. 2437-2446, 2000.

ASHRAF, M.; RAHMATULLAH; AHMAD, R.; BHATTI, A. S.; AFZAL, M.; SARWAR, A.; MAQSOOD, M. A.; KANWAL, S. Amelioration of Salt Stress in Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) by Supplying Potassium and Silicon in Hydroponics. **Pedosphere**, China, v. 20, n. 2, p. 153-162, 2010.

BENLLOCH-GONZÁLEZ, M.; ARQUERO, O.; FOURNIER, J. M.; BARRANCO, D.; BENLLOCH, M. K⁺ starvation inhibits water-stress-induced stomatal closure. **Journal of Plant Physiology**, Germany, v. 165, n. 6, p. 623-630, 2008.

BENLLOCH-GONZÁLEZ, M.; ROMERA, J.; CRISTESCU, S.; HARREN, F.; FOURNIER, J. M.; BENLLOCH, M. K⁺ starvation inhibits water-stress-induced stomatal closure via ethylene synthesis in sunflower plants. **Journal of Experimental Botany**, United Kingdom, v. 61, n. 4, p. 1139-1145, 2010.

CAIONE, G.; SILVA, A. F.; REIS, L. L.; DALCHIAVON, F. C.; TEIXEIRA, M. T. R.; SANTOS, P. A. Doses de potássio em cobertura na primeira soca da cana-de-açúcar cultivada no norte Matogrossense. **Bioscience Journal**, Uberlandia, v. 27, n. 4, p. 572-580, 2011.

CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F.; MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V, V. H.; BARROS, N. F. D.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. Cap.XIII. p. 769-850.

CAVALCANTE, V. S.; PRADO, R. M.; ALMEIDA, H. J.; CRUZ, F. J. R.; SANTOS, D. M. M. Gaseous exchanges, growth and foliar anatomy of sugarcane plants grown in potassium (K) deprived nutrient solution. **Australian journal of Crop Science**, Lismore, v. 9, n. 7, p. 577-584, 2015.

CELLA, D.; ROSSI, M. C. L. Análise do mercado de fertilizantes no Brasil. **Interface tecnológica** [S.I.], v. 7, n. 1, p. 42-52, 2010.

Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília: Conab, v. 1, n. 3. 2016.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. D.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. Cap.III. p. 91-132.

DIAS, N. S.; BLANCO, F. F. Efeitos dos sais no solo e na planta. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. (Ed.). **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. Fortaleza/CE: INCT Sal, 2010. Cap.9. p. 129-140.

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 225 p.

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

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; SANTOS, F. C. Potássio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. D.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007a. Cap.IX. p. 551-594.

ERNANI, P. R.; BAYER, C.; ALMEIDA, J. D.; CASSOL, P. C. Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo método de aplicação de cloreto de potássio em solos com carga variável. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 393-402, 2007b.

FANAEI, H. R.; GALAVI, M.; KAFI, M.; GHAMBARI BONJAR, A. Amelioration of water stress by potassium fertilizer in two oil seed species. **International Journal of Plant Production**, Iran, v. 3, n. 2, p. 41-54, 2009.

FERREIRA, D. F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Symposium**, Lavras, v. 6, p. 36-41, 2008.

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

IPA. **Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco: 2ª aproximação** Recife: Instituto Agrônomo de Pernambuco - IPA, 2008. 212 p.

KAFKAFI, U. The functions of plant K in overcoming environmental stress situations. In: **Proceedings** of the 22nd colloquium of the international potassium institute, Soligorsk, USSR. International potash institute, 1990. p.81-94.

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

MOURA FILHO, G.; ALBUQUERQUE, A. W.; MOURA, A. B.; SANTOS, A. C. I.; OLIVEIRA FILHO, M. S.; SILVA, L. C. Diagnose nutricional de variedades de cana-de-açúcar em argissolos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 11, p. 1102-1109, 2014.

OLIVEIRA, A. C. **Interação da adubação nitrogenada e molíbdica em cana-de-açúcar.** (2012). 97 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2012.

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

OLIVEIRA, E. C. A. D.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I. D.; FREIRE, M. B. G. D. S.; SIMÕES NETO, D. E.; SILVA, S. A. M. D. 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.

OLIVEIRA, M. W.; SILVA, V. S. G.; REIS, L. S.; OLIVEIRA, D. C.; SILVA, J. C. T. Produção e qualidade de tres variedades de cana-de-açúcar cultivadas no nordeste de Minas Gerais. **Ciência Agrícola**, Rio Largo, v. 12, n. 1, p. 9-16, 2014.

OLIVEIRA, R. A; DAROS, E; HOFFMANN, H. P (org.). **Liberção nacional de variedades RB de cana-de-açúcar.** 1. ed. Curitiba: Graciosa, 2015. 72 p.

REIS JR, R. A.; MONNERAT, P. H. Diagnose nutricional da cana-de-açúcar em campos dos Goytacazes (RJ). **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 367-372, 2002.

RIDESA. **Catálogo nacional de variedades "RB" de cana-de-açúcar.** Curitiba: RIDESA, 2010. p. 136.

ROSETTO, 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/SP: Instituto Agronomico, 2008. Cap.12. p. 289-312.

SANTOS, C. M.; ALMEIDA SILVA, M.; LIMA, G. P. P.; BORTOLHEIRO, F. P. D. A. P.; BRUNELLI, M. C.; HOLANDA, L. A.; OLIVER, R. Physiological Changes Associated with Antioxidant Enzymes in Response to Sugarcane Tolerance to Water Deficit and Rehydration. **Sugar Tech**, India, p. 1-14, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12355-014-0325-2>>

SANTOS, E. F.; DONHA, R. M. A.; ARAÚJO, C. M. M.; LAVRES JÚNIOR, J.; CAMACHO, M. A. Faixas normais de nutrientes em cana-de-açúcar pelos métodos ChM, DRIS e CND e nível crítico pela distribuição normal reduzida. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 1651-1658, 2013.

SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; OLIVEIRA, E. C. A.; ROCHA, A. T. Adubação fosfatada para cana-de-açúcar em solos representativos para o cultivo da espécie no Nordeste brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 1, p. 73-81, 2015.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Cátions hidrosolúveis na parte aérea de culturas anuais mediante aplicação de calcário e gesso em superfície. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 81-90, 2007.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema de plantio direto recém-implantado. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 675-688, 2008.

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

UCHÔA, S. C. P.; ALVES JÚNIOR, H. O.; ALVES, J. M. A.; MELO, V. F.; FERREIRA, G. B. Resposta de seis variedades de cana-de-açúcar a doses de potássio em ecossistema de cerrado de Roraima. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, n. 4, p. 505-513, 2009.

VICO, G.; MANZONI, S.; PALMROTH, S.; WEIH, M.; KATUL, G. A perspective on optimal leaf stomatal conductance under CO₂ and light co-limitations. **Agricultural and Forest Meteorology**, United States of America, v. 182-183, p. 191-199, 2013.

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

WANG, N.; HUA, H.; EGRINYA ENEJI, A.; LI, Z.; DUAN, L.; TIAN, X. Genotypic variations in photosynthetic and physiological adjustment to potassium deficiency in cotton (*Gossypium hirsutum*). **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, Canada, v. 110, p. 1-8, 2012.

WARAICH, E. A.; AHMAD, R.; ASHRAF, M. Y. Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. **Australian journal of Crop Science**, Lismore, v. 5, n. 6, p. 764-777, 2011.

ZAMBROSI, F.; ALLEONI, L.; CAIRES, E. Nutrient concentration in soil water extracts and soybean nutrition in response to lime and gypsum applications to an acid Oxisol under no-till system. **Nutrient Cycling in Agroecosystem** United States of America, v. 79, n. 2, p. 169-179, 2007.

4. CAPÍTULO II: NÍVEL CRÍTICO DE POTÁSSIO EM CANA-DE-AÇÚCAR

NÍVEL CRÍTICO DE POTÁSSIO EM CANA-DE-AÇÚCAR

Resumo

O K é o nutriente exigido em maior quantidade pela cana-de-açúcar. A calibração das necessidades de adubação é realizada de acordo com a expectativa de produtividade de uma variedade e os teores do nutriente no solo. Esse fato evidencia a necessidade de calibração para as novas variedades lançadas, bem como, a calibração em solos reconhecidamente deficientes nesse nutriente. O objetivo desse trabalho foi avaliar o nível crítico de K no solo e na planta. Um experimento em campo foi realizado com seis doses de K_2O (0, 25, 50, 100, 200 e 250 $kg\ ha^{-1}$) e uma variedade de cana-de-açúcar, RB992506. Foram avaliados os teores e níveis críticos de K no solo e na folha +1, a condutividade elétrica da pasta de saturação e a produtividade agrícola (colmos) e industrial (Açúcares totais recuperáveis). As doses de K_2O aplicadas promoveram aumento dos teores de K no solo e na folha, bem como aumento da produtividade agrícola e do teor de açúcares totais recuperáveis da cana-de-açúcar. A dose e a produtividade de máxima eficiência agrônômica foram de 150 $kg\ ha^{-1}$ e 116 $Mg\ ha^{-1}$, respectivamente. A partir dessa dose houve diminuição da produtividade da cana-de-açúcar devido ao aumento da salinidade do solo pelas doses do adubo. Os níveis críticos no solo e planta foram de 0,18 $cmol_c\ dm^{-3}$ e 9,53 $g\ kg^{-1}$, que servirá de parâmetro para avaliação da fertilidade potássica dos solos arenosos cultivados com cana-de-açúcar no Nordeste, com ênfase para o Estado da Paraíba.

Palavras-chave: *Saccharum spp.*. Cana planta. salinidade na cana. K trocável

CRITICAL LEVEL OF POTASSIUM IN SUGARCANE

Abstract

K is the nutrient required in greater quantity by sugarcane. The calibration of fertilization needs is performed according to the expectation of productivity of a variety and the soil nutrient contents. This fact evidences the need of calibration for the new varieties released, as well as, the calibration in soils with recognized nutrient deficiency. The aim of this work was to evaluate the critical level of K in soil and plant. A field experiment was performed with six rates of K₂O (0, 25, 50, 100, 200 and 250 kg ha⁻¹) and a variety of sugarcane, RB992506. The contents and critical levels of K in soil and leaf +1, the electrical conductivity of saturation paste and the agricultural (stem) and industrial (total recoverable sugars) were evaluated. The rates of K₂O applied promoted an increase in soil and leaf K, as well as an increase in agricultural productivity and in the total recoverable sugar content from sugarcane. The maximum agronomic efficiency rate and productivity were 150 kg ha⁻¹ and 116 Mg ha⁻¹, respectively. From this rate, there was a decrease in sugarcane yield due to the increase of soil salinity by the fertilizer. The soil and plant critical levels were 0.18 cmolc dm⁻³ and 9.53 g kg⁻¹, which will serve as a parameter to evaluate the potassium fertility of sandy soils cultivated with sugarcane in the Northeast, with emphasis on The State of Paraíba.

Keywords: *Saccharum* spp. First Ratoon. Sugarcane Salinity. Exchangeable K.

4.1. Introdução

A cana-de-açúcar é uma das culturas agrícolas de maior importância econômica para o Brasil. A área plantada em todo o país foi de 9.110,9 mil hectares com produtividade agrícola média de 76 Mg ha⁻¹ e a produção no biênio 2015/2016 foi de 694,5 mil toneladas (CONAB, 2016).

Dentre os nutrientes requeridos pela cana-de-açúcar, o K é o nutriente com maior demanda, podendo ser extraído do solo até 400 kg ha⁻¹ do nutriente pela cultura (OLIVEIRA et al., 2011). Na planta, o K participa de processos biofísicos e bioquímicos, como a abertura e fechamento estomático e promoção de turgor celular. Ele é ativador de mais de 40 complexos enzimáticos, atuando no metabolismo de proteínas e carboidratos, no transporte de fotoassimilados e como osmoregulador (ERNANI et al., 2007; NASCIMENTO; LAPIDO-LOUREIRO, 2009; ZÖRB et al., 2014).

A maior parte dos solos brasileiros, como argissolos e latossolos cultivados com cana-de-açúcar, devido ao elevado grau de intemperismo e ao material de origem, são pouco férteis em K (MELO et al., 2003; MEDEIROS et al., 2014). Este fato, aliado a sua imprescindível função fisiológica na planta e, ainda pela elevada absorção de K pela cultura, enfatiza a necessidade de estudos de demanda do nutriente em diferentes condições edafoclimáticas onde a cana-de-açúcar é cultivada.

Diversos trabalhos vêm sendo realizados a fim de aprimorar o diagnóstico e recomendação da adubação potássica para cana-de-açúcar. Contudo, características intrínsecas das mais diversas variedades cultivadas e diferentes tipos de solo promovem grandes diferenças nas respostas às adubações (UCHÔA et al., 2009; OTTO et al., 2010; CAIONE et al., 2011).

Em estudo com seis variedades de cana-de-açúcar, UCHÔA et al. (2009) observaram que as doses de máxima eficiência econômica variaram significativamente entre as variedades. A maior dose foi de 165 e a menor de 94 kg ha⁻¹ de K₂O. Em outro estudo, em relação à dose de máxima eficiência agrônômica, Otto et al. (2010) observaram que a dose que promoveu maior produtividade da cana-de-açúcar (160 Mg ha⁻¹) foi de 150 kg ha⁻¹ de K₂O. Schultz et al. (2010) também observaram maior produtividade da cana-de-açúcar quando adubada com a dose de 120 kg ha⁻¹ de K₂O, combinada com 80 kg ha⁻¹ de N.

Os níveis críticos de K no solo também podem ser muito variados, como constatado na literatura. Existem diversas sugestões de níveis críticos de K para cana-de-açúcar. Orlando filho et al. (1981) sugeriram nível crítico de $0,23 \text{ cmolc dm}^{-3}$, Rodella et al. (1983) sugeriram $0,20 \text{ cmolc dm}^{-3}$, Raij (1974) sugeriu $0,21 \text{ cmolc dm}^{-3}$, Chalita (1991) sugeriu 0,15 e 0,12 cmolc dm^{-3} para cana planta e cana soca, respectivamente, e o Manual de Recomendações de Adubação para o Estado de Pernambuco sugere $0,15 \text{ cmolc dm}^{-3}$ (IPA, 2008). Muitos fatores podem ser responsáveis por essa variação, como o teor de argila do solo, devido ser o sítio de adsorção do K trocável. Adicionalmente, conforme foi constatado por Wietholter (2007) em seu estudo, para cada acréscimo de 10% no teor de argila do solo, entre 8 ou 9 kg ha^{-1} a mais de K foram necessários para a adubação de trigo.

No Nordeste grande parte do cultivo de cana-de-açúcar é realizado em solos dos Tabuleiros Costeiros, que são muito arenosos, influenciando significativamente nos níveis críticos. O nível crítico sugerido pelo Manual de Recomendações de Adubação para o Estado de Pernambuco (IPA, 2008) é muito genérico, como é comum em tabelas de recomendação dos Estados. Adicionalmente, os estudos que estabeleceram esses níveis críticos são antigos. Novas tecnologias e manejo de cultivo têm sido implementadas em cana-de-açúcar, como o uso de resíduos, por exemplo. Isso impacta diretamente na nutrição potássica e torna imprescindível uma atualização dos estudos com fertilização de K, para agregar conhecimento e aprimorar a produtividade agrícola da cultura.

Além da produtividade agrícola, grande atenção tem sido dada ao K devido as suas funções no metabolismo e transporte de carboidratos (ZÖRB et al., 2014). Postula-se que o maior suprimento de K promova maior acúmulo de sacarose no caldo da cana-de-açúcar. Esse fato foi observado por Ashraf et al. (2009). Por outro lado, houve também relatos da ausência de efeito da nutrição potássica sobre o acúmulo de sacarose (CAIONE et al., 2011).

Assim, a produtividade industrial também precisa ser investigada em plantas bem supridas de K, podendo-se, inclusive se estabelecer níveis críticos para essa importante variável de produção. O pagamento da matéria prima cana-de-açúcar aos agricultores que fornecem esse produto para indústria é baseado no teor de açúcar e não apenas no peso dos colmos. Como as funções fisiológicas do K estão diretamente envolvidas com a produção de açúcar, produzir conhecimento nesse aspecto é fundamental para o agricultor e a indústria.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a produtividade agrícola e industrial na variedade de cana-de-açúcar RB992506, estabelecer níveis críticos de K em solo

arenoso e determinar o teor crítico de K na folha índice que maximize a produção em função da aplicação de quantidades crescentes de K.

4.2. Material e métodos

4.2.1. Caracterização do local do ensaio de campo

Foi instalado um campo experimental no município de Caaporã, Paraíba, Brasil, com coordenadas geográficas 7°30'30.194324" de Latitude Sul e 34°52' 33.169375" de Longitude Oeste. O município está a 37 m acima do nível do mar e apresenta clima Am, segundo a classificação climática de Köppen-Geigerem. O ensaio foi instalado no campo agrícola da Destilaria Tabu.

Na área do ensaio foram coletadas cinco amostras de solo nas profundidades 0,0-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60; 0,60-0,80; e 0,80-1,00 m para compor uma amostra composta e realizada análises químicas para avaliação da fertilidade [$\text{pH}_{\text{água}}$, P, Na^+ , K^+ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$, Al^{3+} , (H+Al)]. Foram também determinados os teores de Zn, Cu, Mn, Fe e o teor de C orgânico total (COT) no ensaio (Donagema et al., 2011). Com os resultados dessas análises foi calculada capacidade de troca de cátions potencial ($\text{CTC}_{\text{potencial}}$) e efetiva ($\text{CTC}_{\text{efetiva}}$), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m).

Fisicamente, o solo foi caracterizado pela granulometria, densidade das partículas, densidade do solo e porosidade total (DONAGEMA et al., 2011) (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização química e física do solo

Atributo	Profundidade (m)				
	0,0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1,0
pH _{água} (1:2,5)	4,7	4,4	4,0	4,0	4,0
P (mg dm ⁻³)	8,0	2,1	0	0	0
Na ⁺ (cmolcdm ⁻³)	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
K ⁺ (cmolcdm ⁻³)	0,12	0,01	0,01	0,01	0
Ca ²⁺ +Mg ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	2,1	1,5	1,4	1,6	1,2
Al ³⁺ (cmolcdm ⁻³)	0,2	0,2	0,4	0,5	0,6
(H + Al) (cmolcdm ⁻³)	2,3	1,9	1,8	2,0	2,1
CTC _{efetiva} (cmolc dm ⁻³) ⁽¹⁾	2,4	1,7	1,8	2,1	1,8
CTC _{potencial} (cmolc dm ⁻³) ⁽²⁾	4,5	3,4	3,2	3,6	3,3
V (%) ⁽³⁾	48,4	44,5	44,1	44,7	36,7
m (%) ⁽⁴⁾	8,5	11,6	22,0	23,6	33,0
COT (g kg ⁻¹) ⁽⁵⁾	3,0	1,56	1,11	0,72	0,60
Fe (mg dm ⁻³)	88,3	92,96	120,44	99,02	82,44
Cu (mg dm ⁻³)	4,43	1,93	0,91	0,92	0,65
Zn (mg dm ⁻³)	1,25	1,93	2,42	1,71	2,45
Mn (mg dm ⁻³)	5,09	1,93	1,54	1,42	1,49
Areia (g kg ⁻¹)	84,52	72,92	66,18	53,94	54,54
Silte (g kg ⁻¹)	3,48	11,08	13,82	24,06	5,46
Argila (g kg ⁻¹)	12	16	20	22	40
Classe textural	Areia franca	Areia franca	Franco arenosa	Franco argilo arenosa	Franco argilo Arenosa
Ds (Mgm ⁻³) ⁽⁶⁾	1,32	1,68	1,61	1,75	1,45
Dp (Mg m ⁻³) ⁽⁷⁾	2,82	2,73	2,72	2,80	2,76
Pt (%) ⁽⁸⁾	53,05	38,29	40,63	37,38	47,19

¹Capacidade de troca de cátions efetiva; ²Capacidade de troca de cátions potencial; ³Saturação por bases;

⁴Saturação por alumínio; ⁵Carbono orgânico total; ⁶Densidade do solo; ⁷Densidade das partículas; ⁸Porosidade total

A precipitação pluviométrica durante o ensaio experimental foi de 1.800 mm (Figura 1).

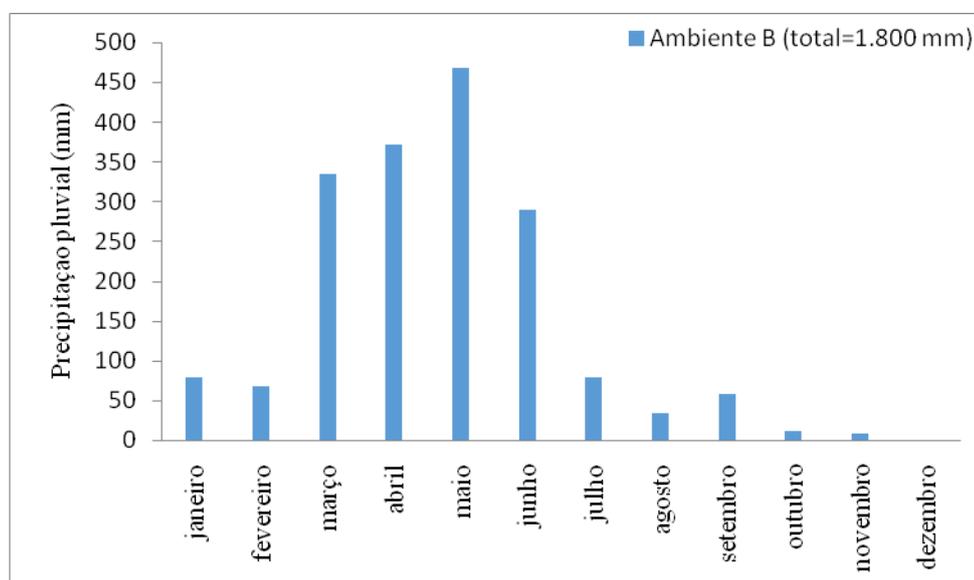


Figura 1. Precipitação pluviométrica durante o experimento

4.2.2. Ensaio experimental

O experimento foi implantado em blocos ao acaso e utilizada a variedade RB992506 que é uma das variedades mais recentemente liberadas pela Rede Interuniversitaria de Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (RIDESA) (OLIVEIRA, 2015). Foram aplicadas as seguintes doses de K_2O (0; 25; 50; 100; 200; e 250 $kg\ ha^{-1}$) com quatro repetições, totalizando 24 parcelas experimentais

As parcelas do experimento compreenderam seis linhas de plantio com 10,0 m de comprimento com espaçamento de 1,5 x 0,9 m, correspondendo a uma área total de 72 m^2 . A área útil correspondeu às quatro linhas centrais com exclusão de 1,0 m de cada lado da parcela, totalizando 37,6 m^2 de área útil.

O preparo do solo foi realizado com controle químico de plantas espontâneas, subsolagem, aragem e gradagem e, posterior, sulcagem do solo. O plantio foi realizado em 20 de Janeiro de 2016 e colhido em Dezembro (cana de ano). A cana-de-açúcar foi plantada distribuindo-se colmos no sulco de modo a coincidir a extremidade de um com a base do

outro. Foram distribuídos aproximadamente 18 Mg ha⁻¹ de colmos, com posterior seccionamento de modo a se obter, em média, 24 gemas por metro linear.

O solo do ensaio do experimento foi corrigido, utilizando-se 1,1 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico, com PRNT de 85%. A necessidade de calagem foi calculada pelo método da saturação por bases (IPA, 2008), elevando-se a saturação para 70%. Foi aplicado 1,0 Mg ha⁻¹ de gesso mineral na área experimental baseada na exportação de Ca pela cultura para quatro cultivos sucessivos (OLIVEIRA et al., 2010). Os corretivos foram aplicados a lanço em área total sem incorporação.

Foi realizada adubação de fundação no sulco de plantio com 60 kg ha⁻¹ de N na forma de uréia + 200 g ha⁻¹ de Mo (OLIVEIRA, 2012) e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ com superfosfato triplo (SIMÕES NETO et al., 2015). O K foi aplicado conforme a diferenciação dos tratamentos, utilizando-se como fonte o cloreto de potássio. Foram aplicados também 2,6 kg ha⁻¹ de Cu, 4 kg ha⁻¹ de Zn, 5,2 kg ha⁻¹ de Mn na forma de sulfato (IPA, 2008) e 2,0 L ha⁻¹ de B, conforme manejo de adubação utilizado pela empresa. No plantio também foram aplicados fungicida (0,5 L ha⁻¹), nematicida (5 L ha⁻¹) e cupinicida (0,2 kg ha⁻¹) sobre os colmos, antes do fechamento dos sulcos de plantio.

4.2.3. Variáveis mensuradas

4.2.3.1. Teor de K trocável do solo (K recuperado em função do K aplicado)

Trinta dias após a implantação do experimento foram coletadas três amostras simples em ziguezague na área útil de cada parcela para formar uma amostra composta. As amostras foram coletadas nas camadas de 0,0-0,25 e 0,25-0,50 m de profundidade. As amostras foram secas ao ar, destorroadas e tamizadas em peneira de malha de 2 mm. O K trocável do solo foi extraído com o extrator Mehlich-1 na proporção (1:10) a base de volume (solo:solução). A dosagem do K foi realizada em espectrofotômetro de chama (EMBRAPA, 2009).

4.2.3.2. Condutividade elétrica da pasta saturada (CE)

Aproximadamente 300 g de solo de cada amostra foram umedecidos com água deionizada até que o solo apresentou aspecto brilhante. As amostras ficaram em repouso por

uma noite. Posteriormente, as amostras foram colocadas em funis com papel de filtro e realizada sucção com bomba de vácuo para coleta do extrato da pasta saturada. A CE foi determinada em condutivímetro de bancada (DONAGEMA et al., 2011).

4.2.3.3. Teor de K na folha índice ou diagnóstica da cana-de-açúcar

Aos quatro meses após o plantio, o terço médio, sem a nervura central, de 15 folhas +1 foram coletados em cada parcela para formar uma amostra composta. As folhas foram secas em estufa de ventilação forçada de ar a 65 °C até peso constante e, posteriormente, moídas em moinho tipo Willey. Foi pesada 500 mg de cada amostra composta e submetida a digestão nitroperclórica. O K foi determinado por fotometria de chama (EMBRAPA, 2009).

4.2.3.4. Produtividade agrícola (TCH) e industrial (ATR)

A produtividade agrícola (Mg ha^{-1}) foi avaliada colhendo-se todas as plantas em cada parcela. Após a colheita as plantas foram pesadas em dinamômetro e seus valores estimados para hectare (10.000 m^2). A produtividade industrial foi avaliada pelo açúcar total recuperável (ATR) em kg Mg^{-1} , que foi determinado no laboratório de análises agrotecnológicas da Destilaria Tabu, onde o ensaio foi realizado.

4.2.3.5. Nível crítico de K no solo

Com os dados de produtividade agrícola e os teores de K recuperado (cmolc dm^{-3}) em função do K aplicado no solo (K_2O) (kg ha^{-1}), foi realizada análise de regressão entre essas variáveis. Foi adotado como nível crítico de K no solo, o teor de K correspondente à dose que proporcionou 90% da produção máxima.

4.2.3.6. Nível crítico de K na planta

Com os dados de produtividade agrícola e os teores de K à base de massa seca (g kg^{-1}) determinado na folha +1 em função do K aplicado no solo (K_2O) (kg ha^{-1}), foi realizada análise de regressão entre essas variáveis. Foi adotado como nível crítico de K na planta, o teor de K na folha índice correspondente à dose que proporcionou 90% da produção máxima.

4.2.3.7. Procedimentos estatísticos

Os dados das variáveis dependentes foram submetidos à análise de variância e regressão, porque a variável independente estudada foi quantitativa. Utilizou-se o software SISVAR 5.8 (FERREIRA, 2008).

4.3. Resultados e Discussão

4.3.1. Teor de K no solo e na planta em função da aplicação de K

Os dados dos teores de K trocáveis do solo nas duas camadas avaliadas (0,0-0,25 e 0,25-0,50 m) e nas plantas de cana-de-açúcar em função das quantidades crescentes de K aplicados no solo se ajustaram a modelo linear crescente ($p < 0,05$) (Tabela 2).

Quanto mais K se aplicou no solo, mais o extrator Melhich-1 extraiu K, mesmo na camada subsuperficial (Figura 2A). A textura muito arenosa tanto da camada superficial, como da camada subsuperficial do solo (Tabela 1) facilitou a extração de K e mostrou a efetividade das doses aplicadas. Concomitantemente, o teor de K na folha índice também aumentou linearmente com o aumento das doses de K_2O aplicadas (Figura 2B), como tem se relatado na literatura (UCHÔA et al., 2009; OTTO et al., 2010).

A relação entre doses crescentes de um nutriente e seu teor na folha índice deve ser curvilínear quadrático. Em doses mais elevadas a tendência é de se atingir um patamar e em alguns casos pode haver redução dos teores por efeitos tóxicos. No caso desse estudo as doses aplicadas não foram suficientes para provocar esses efeitos, nem se atingiu o patamar e nem houve redução por toxidez (Figura 2B). Como o K é um nutriente que a planta pode estocar com facilidade, dificilmente se atingiria o patamar da exaustão, principalmente em solos arenosos como desse ensaio.

Tabela 2. Teor de potássio trocável no solo em diferentes profundidades e teor de potássio em folha de cana-de-açúcar em função do potássio aplicado no solo, análise de regressão e coeficientes de variação dos dados

Potássio (K ₂ O) kg ha ⁻¹	K no solo		K na planta
	K (0,0-0,25 m)	K (0,25-0,50 m)	K (folha +1)
	cmolcdm ⁻³		g kg ⁻¹
0	0,16	0,04	9,27
25	0,15	0,07	9,62
50	0,24	0,15	9,81
100	0,29	0,21	10,39
200	0,36	0,33	10,57
250	0,43	0,33	11,15
	F regressão		
Regressão Linear	36,14*	104,19*	12,57*
Regressão Quadrática	0,27ns	4,05ns	0,20ns
C.V. (%)	28,20	27,45	8,32

⁽¹⁾Coeficiente de variação = Desvio padrão/Média x 100

*Significativo a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo

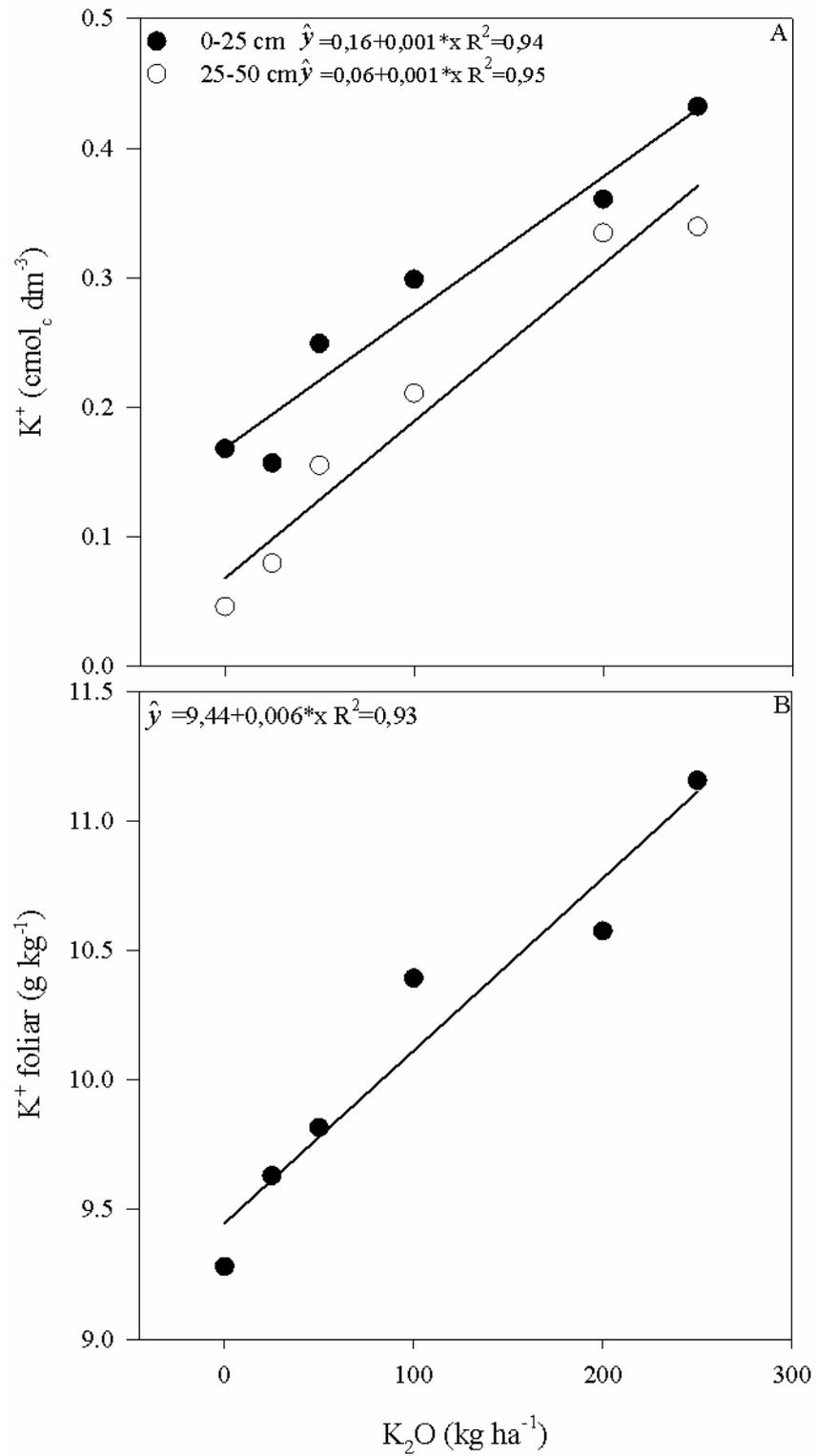


Figura 2. Teor de potássio trocável no solo em diferentes profundidades (A) e teor de potássio em folha de cana-de-açúcar (B) em função do potássio aplicado no solo

4.3.2. Produtividade agrícola e industrial em função da aplicação de K

O aumento da produtividade agrícola da cana-de-açúcar devido à aplicação de doses crescentes de K (Tabela 3) é bem relatado na literatura (UCHÔA et al., 2009; CAIONE et al., 2011). Assim como, alterações em atributos químicos do solo como os teores de K trocável em profundidade (Tabela 2) e a condutividade elétrica do solo (CE) (PEIXOTO et al., 2006; WATANABE et al., 2015; UCKER et al., 2016). O aumento do ATR da cana-de-açúcar por aplicações crescentes de K é controverso, existindo relatos em que se constatou esse incremento e outros em que não se detectou efeito positivo do K na elevação dos teores de açúcares (KWONG, 2002).

Tabela 3. Produtividade agrícola e industrial de cana-de-açúcar em função do potássio aplicado no solo, análise de regressão e coeficientes de variação dos dados

Potássio (K ₂ O)	Produtividade	
	Industrial (ATR) ⁽¹⁾	Agrícola (TCH) ⁽²⁾
kg ha ⁻¹	kg Mg ⁻¹	Mg ha ⁻¹
0	160,22	103,71
25	165,16	105,57
50	160,67	108,08
100	165,46	115,72
200	170,93	113,43
250	171,4	108,28
	F regressão	
Regressão Linear	15,58*	1,91ns
Regressão Quadrática	0,003ns	5,05*
C.V. (%) ⁽³⁾	3,02	6,86

¹ Açúcar total recuperável; ² Tonelada de cana por hectare; ³ Coeficiente de variação = Desvio padrão/Média x 100. *Significativo a 5% de probabilidade. ^{ns} Não significativo.

A aplicação das doses de K promoveu efeito quadrático significativo ($p < 0,05$) na produtividade agrícola da cana-de-açúcar (Figura 3A). A dose que promoveu maior incremento na produtividade foi a dose de 100 kg ha⁻¹ de K₂O que promoveu produtividade média de 116 Mg ha⁻¹, enquanto que o controle apresentou produtividade média de 104 Mg

ha⁻¹. O aumento de 12 Mg ha⁻¹ na produtividade de colmos representou um incremento aproximado de 12% na produção.

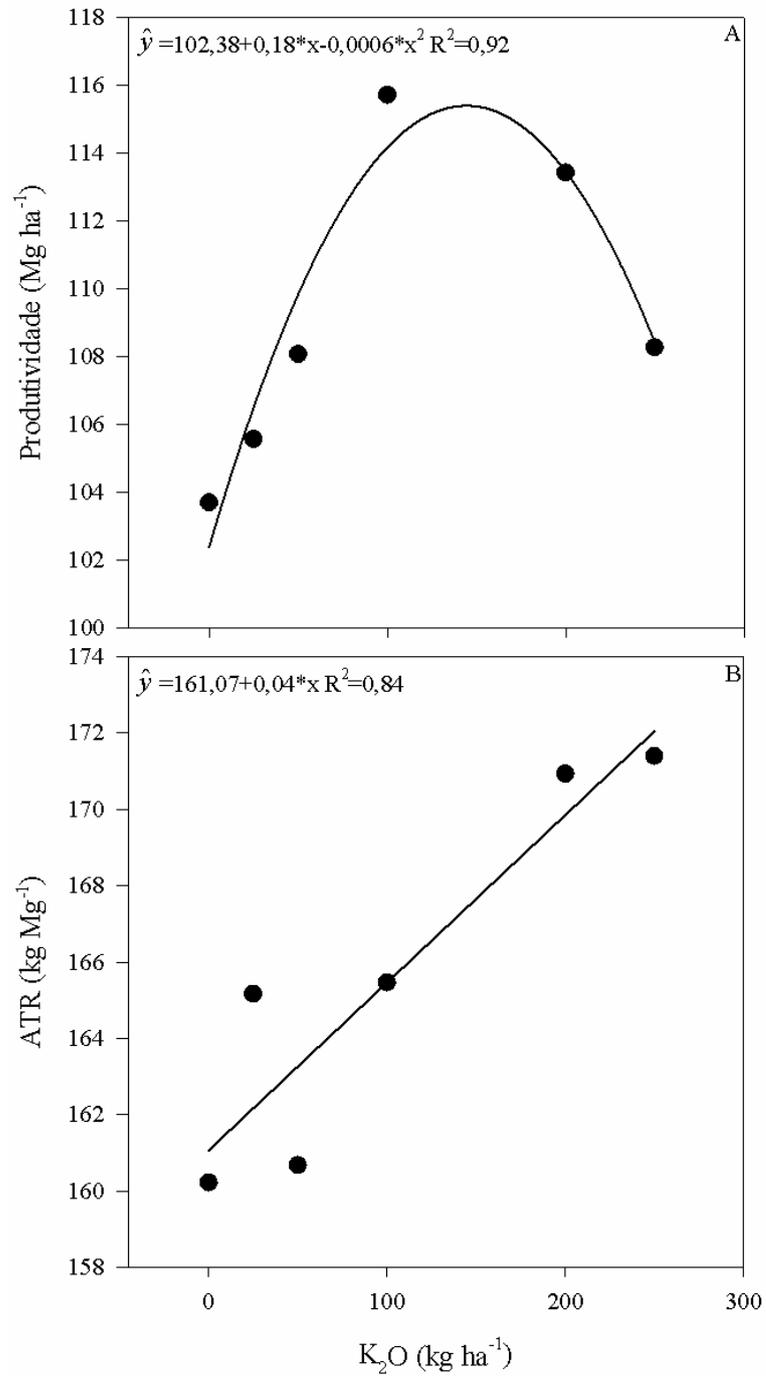


Figura 3. Produtividade agrícola (A) e ATR (B) de cana-de-açúcar em função do potássio aplicado no solo

Em estudo com doses crescentes de K até 240 kg ha⁻¹ aplicadas como K₂O na variedade IAC86-2480 em Argissolo Amarelo distrófico argiloso, foi observado incremento de produção de 25% em relação ao tratamento controle. No entanto, o tratamento que proporcionou maior produtividade agrícola foi o tratamento com a dose de 120 kg ha⁻¹ de K₂O (CAIONE et al., 2011).

As variedades de cana-de-açúcar possuem capacidade de resposta diferenciada à aplicação de K. Em estudo com seis variedades de cana-de-açúcar (RB72454, SP813250, SP791011, SP801816, RB867515 e RB855336) foi observado que o incremento na produtividade de colmos variou de 55 a 186% em relação ao controle. As variedades mais produtivas foram as RB72454 que o incremento foi de 186% (36,7 Mg ha⁻¹) e a RB867515 com incremento de 178% (40,7 Mg ha⁻¹). A variedade com menor incremento na produtividade foi a SP801816 com 55% de aumento (13,6 Mg ha⁻¹) em relação ao controle (UCHÔA et al., 2009). Apesar dos incrementos em percentagem reportados na produtividade terem sido maiores do que as deste estudo, todos os tratamentos promoveram produtividades acima de 100 Mg ha⁻¹. Adicionalmente, o aumento na produtividade de colmos de 12% (12 Mg ha⁻¹) do tratamento em que se aplicou a dose de 100 kg ha⁻¹ de K₂O foi semelhante ao aumento de produtividade de 55% (13,6 Mg ha⁻¹) do tratamento em que se aplicou a dose de 240 kg ha⁻¹ no trabalho avaliado por Uchôa et al. (2009).

Além de aumentar a produtividade agrícola da cana-de-açúcar (Tabela 3) e o teor de K nas folhas (Figura 2B), as doses crescentes de K₂O aumentaram significativamente ($p < 0,05$) a produção de açúcares totais recuperáveis (Figura 3B). O K é imprescindível no carregamento dos açúcares dos órgãos fonte para os drenos. Muitos estudos determinaram que a deficiência de K, mesmo sem sintomas visuais na folha, proporcionou maior acúmulo de açúcares na folha e redução da translocação de fotossintatos dos órgãos fonte para os drenos (HARTT, 1969, 1970; ZÖRB et al., 2014). Em estudo realizado em plantas deficientes em K sobre a exportação de açúcares no algodoeiro, foi observado que as plantas deficientes exportaram até 3,5 vezes menos açúcares do que plantas suficientes em K (WANG et al., 2012). Adicionalmente, a sua função no transporte de fotossintatos, o K atua no metabolismo de carboidratos (RAO et al., 2014).

Em outro experimento em ambiente protegido, a concentração de sacarose no caldo da cana-de-açúcar também variou em relação às quantidades de K e o período da amostragem. Quando a avaliação foi realizada cinco meses após o início do experimento, as doses de KCl promoveram aumento da concentração de sacarose no caldo da cana-de-açúcar, contudo, nas

demais amostragens (7, 9 e 11 meses) os tratamentos com maiores doses de KCl apresentaram concentrações de sacarose inferiores ao do tratamento controle (WATANABE et al., 2015).

Em experimento com aplicação de K_2O na dose de 120 kg ha^{-1} em solo salino, foi observado melhoria na qualidade do caldo da cana-de-açúcar. A percentagem de sólidos solúveis no caldo (brix) aumentou 60%, a percentagem de sacarose no caldo (Pol) aumentou 52% e houve aumento de 46% para os açúcares recuperáveis na variedade sensível à salinidade (ASHRAF et al., 2009). No entanto, em outro experimento em campo com doses de K_2O até 200 kg ha^{-1} não foi observado efeito das quantidades crescentes de K sobre o aumento do açúcar total recuperável (ATR), contudo, a produção de açúcares aumentou, devido ao aumento da produtividade da cana-de-açúcar (OTTO et al., 2010).

Nesse estudo as doses mais elevadas de K_2O aplicadas promoveram um decréscimo na produtividade agrícola, porém as plantas mantiveram o efeito linear da concentração de açúcar com o incremento das doses de K_2O aplicadas (Figura 3). Como o teor de K na folha índice manteve-se crescente, mesmo na maior dose de K_2O , significou que não houve efeito tóxico do nutriente. A alta solubilidade do adubo KCl pode promover um acréscimo significativo na CE da solução do solo, interferindo na nutrição da cana-de-açúcar.

4.3.3. Condutividade elétrica da solução do solo em função da aplicação de K

Em experimentos em que se utilizam quantidades crescentes de adubos, as principais causas de decréscimo na produtividade são a toxidez causada pelos nutrientes e o aumento da salinidade do solo na rizosfera das plantas. Os dados desse trabalho apresentaram regressão linear significativa ($p < 0,05$), tanto para o teor de K na folha (Figura 2B), como para a CE do solo em relação às doses de K aplicadas (Tabela 4).

Tabela 4. Condutividade elétrica da solução do solo cultivado com cana-de-açúcar em diferentes profundidades em função do potássio aplicado no solo, análise de regressão e coeficientes de variação dos dados

Potássio (K ₂ O) kg ha ⁻¹	Condutividade elétrica	
	CE (0,0-0,25 m)	CE (0,25-0,50 m)
	dS m ⁻¹	
0	1,27	0,73
25	1,29	0,67
50	1,27	0,97
100	1,28	1,11
200	1,4	1,33
250	1,65	1,40
	F regressão	
Regressão Linear	5,58*	31,68*
Regressão Quadrática	1,41ns	1,08ns
C.V. (%) ⁽¹⁾	22,1	8,32

¹Coeficiente de variação = Desvio padrão/Média x 100.

*Significativo a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo

A toxidez causada por macronutrientes, em especial K, é contraditória na literatura, havendo relatos desse efeito (DECHEN; NACHTIGALL, 2007; OTTO et al., 2010), assim como relatos contrários ao efeito tóxico do K nas plantas (MEURER, 2006). O mais comum consiste na observação de níveis tóxicos em experimentos em que se aplica doses crescentes de micronutrientes

Os dados das doses de K aplicadas nesse estudo apresentaram efeito linear crescente significativo ($p < 0,05$) com a condutividade elétrica da pasta saturada (CE) em ambas as profundidades avaliadas (Figura 4). A CE se elevou para 1,65 e 1,40 dSm⁻¹ nas profundidades 0,0-0,25m e 0,25-0,50 m, respectivamente (Tabela 4). Esses são valores muito próximos do proposto por Dias e Blanco (2010) para a cana-de-açúcar, como limite de tolerância à salinidade, que foi de 1,7 dSm⁻¹.

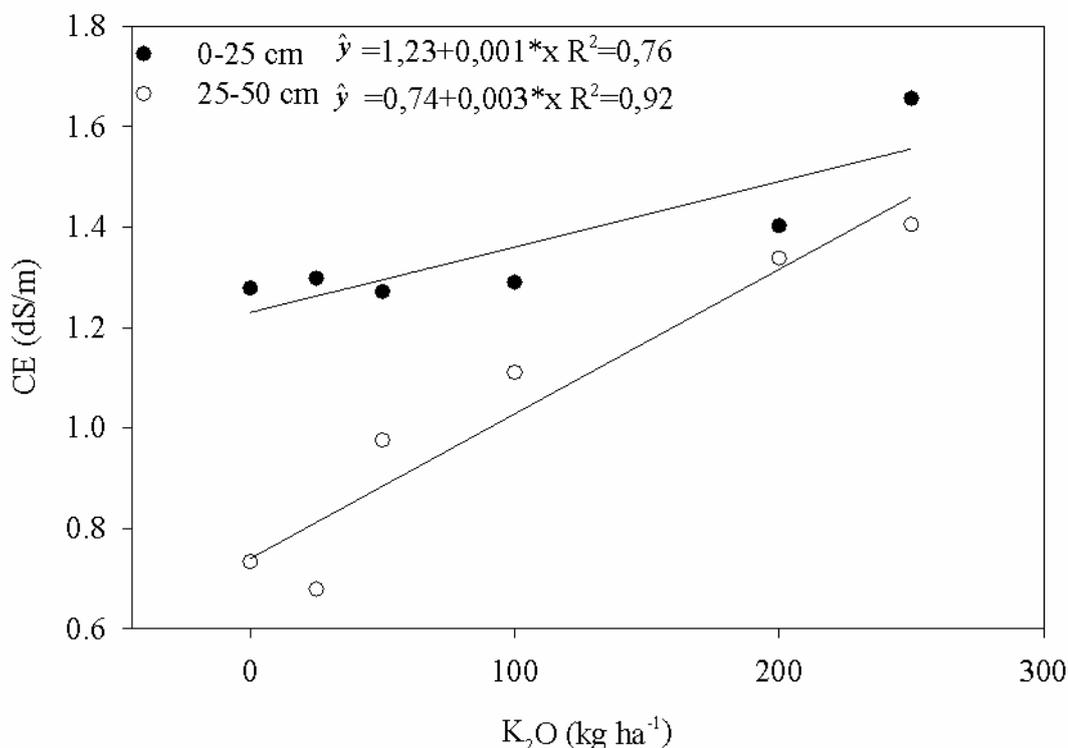


Figura 4. Condutividade elétrica da solução do solo cultivado com cana-de-açúcar em diferentes profundidades em função do potássio aplicado no solo

Adicionalmente, em solos arenosos, valores mais baixos de CE podem influenciar mais intensamente o desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar. Em experimento com águas salinas em solos de textura arenosa, média e argilosa, foi observado que a irrigação da variedade de cana-de-açúcar SP80-1842 com água de CE de $2\ dS\ m^{-1}$ foi suficiente para promover redução de aproximadamente 10% na brotação das plantas de cana-de-açúcar, sendo observado maior efeito da CE, ou seja, menor brotação das plantas, no solo arenoso do que nas demais texturas (SANTANA et al., 2007).

Particularmente, nesse estudo, como o íon cloreto compõe o adubo potássico utilizado como fonte de K (KCl), o decréscimo na produtividade pode também ter sido efeito da toxidez desse elemento. No entanto, a diminuição da produtividade em experimentos com doses crescentes de KCl pode ser melhor explicada pelo aumento da salinidade da rizosfera das plantas, promovida pelo incremento de adubo.

O KCl é um fertilizante com elevado índice salino (116). Esse índice consiste na capacidade do fertilizante em aumentar a pressão osmótica da solução do solo em comparação

ao nitrato de sódio, que apresenta índice salino de 100 (ERNANI et al., 2007). Essa característica pode interferir negativamente no desenvolvimento da cana-de-açúcar.

Esse efeito foi relatado na literatura em experimento com cana-de-açúcar e doses crescentes de K_2O , utilizando KCl como fonte fertilizante. No experimento conduzido por Otto et al.(2010), a dose que promoveu máxima produtividade e depois houve decréscimo foi adose de 150 kg ha^{-1} de K_2O .

4.3.4. Nível crítico de K no solo e em plantas de cana-de-açúcar

Ao realizar a primeira derivada da equação de polinômio de segundo grau entre as doses de K_2O aplicadas e a produtividade agrícola foi obtida a dose de máxima eficiência agronômica (DMA) que correspondeu a $150,33 \text{ kg ha}^{-1}$ de K_2O (Figura 5). A partir dessa dose obteve-se a produtividade de máxima eficiência agronômica (116 Mgha^{-1}) e o teor de máxima eficiência agronômica de K trocável no solo ($0,32 \text{ cmolc dm}^{-3}$) e o teor de K na folha índice ($10,45 \text{ g kg}^{-1}$). A dose de máxima eficiência econômica (DME) correspondeu a $11,32 \text{ kg ha}^{-1}$ de K_2O e proporcionou 90% da produtividade de máxima eficiência agronômica (104 Mg ha^{-1}). Portanto, os níveis críticos de K trocável do solo e na planta de cana-de-açúcar foram de $0,18 \text{ cmolc dm}^{-3}$ e $9,52 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente (Figura 5).

A calibração de métodos para diagnóstico dos níveis de fertilidade do solo é de fundamental importância pra o correto e adequado manejo da adubação. O estabelecimento de valores de referência da disponibilidade do nutriente e a quantidade de adubo a ser aplicada em relação à expectativa de resposta da cultura são de fundamental importância para que o plantio seja rentável (CANTARUTTI et al., 2007).

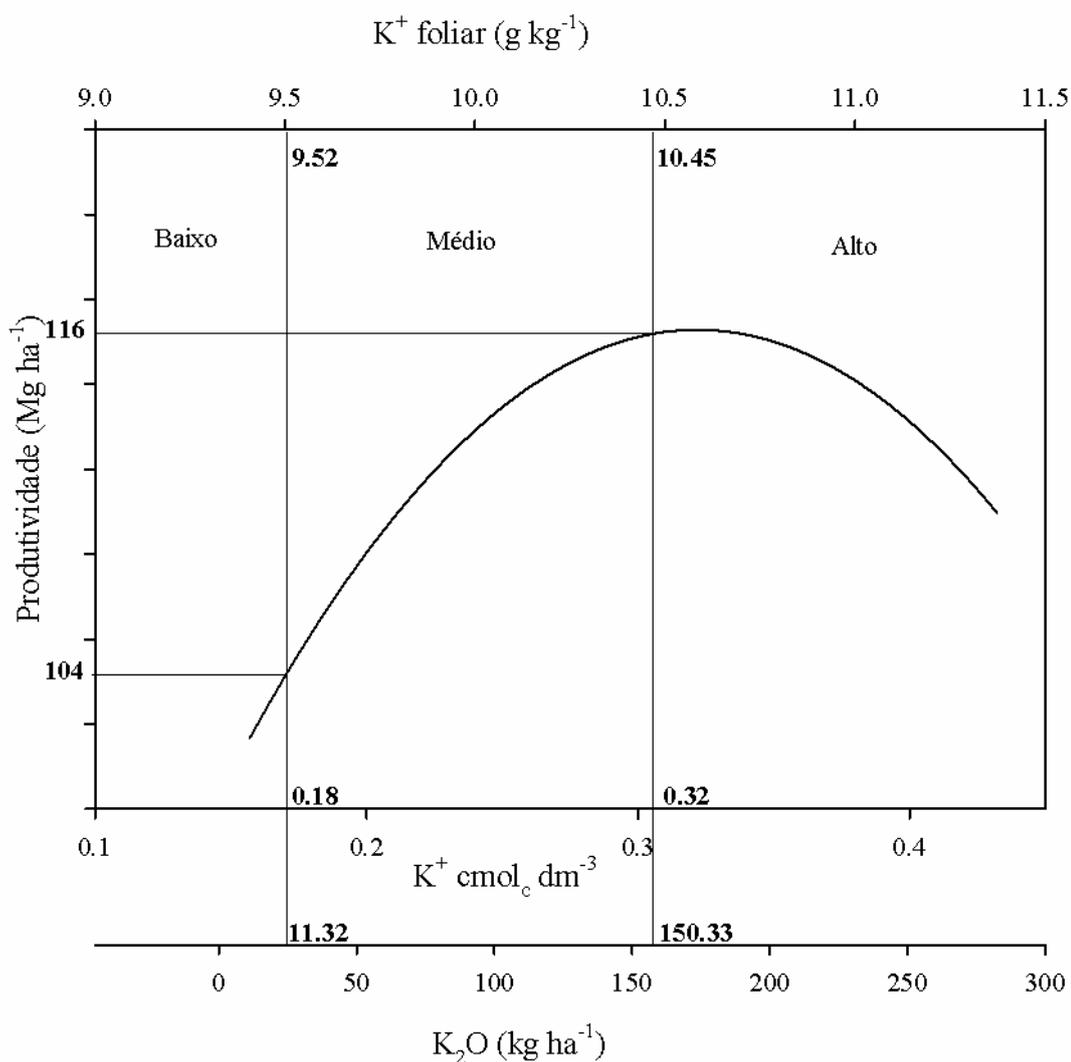


Figura 5. Níveis críticos de K trocável no solo, na planta e produção de máxima eficiência agrônômica e econômica da cana-de-açúcar

Estudos recentes demonstraram diferentes respostas das variedades de cana-de-açúcar a aplicação de quantidades crescentes de K, além de diferenças entre as doses de máxima eficiência econômica e capacidade de absorção de K pela cultura (UCHÔA et al., 2009; OTTO et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2011).

Doses de máxima eficiência econômica entre 94 e 165 $kg\ ha^{-1}$ de K_2O foram observadas por Uchôa et al. (2009) para expectativas de produção de colmos entre 31,9 e 56,9 $Mg\ ha^{-1}$ quando avaliaram seis variedades diferentes. Em outro estudo, a dose e a produtividade de máxima eficiência agrônômica foram de 150 $kg\ ha^{-1}$ de K_2O e 161 $Mg\ ha^{-1}$ de colmos, respectivamente (OTTO et al., 2010).

A variedade de cana-de-açúcar utilizada nesse experimento foi uma das variedades recentemente lançadas, a RB992506 (OLIVEIRA, 2015). Apesar de possuir características de alta produtividade e adaptabilidade, estudos que forneçam as melhores condições para que seu máximo potencial produtivo seja alcançado ainda são incipientes.

Para o estado de Pernambuco, o nível crítico de K no solo é de $0,15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e a recomendação de adubação em K_2O quando esse nível é atingido é de 60 kg ha^{-1} . No entanto, esse valor foi atribuído para variedades que foram quase totalmente substituídas (ROCHA et al., 2014) e para expectativas de produtividade entre 50 e 75 Mg ha^{-1} (IPA, 2008). Nesse estudo, o nível crítico obtido foi de $0,18 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para produtividade agrícola de 104 Mg ha^{-1} (Figura 5).

Na literatura existem diversas sugestões de níveis críticos de K trocável no solo. Contudo, segundo Reis Jr e Monnerat (2002), a calibração dos teores adequados de nutrientes para cada ambiente de produção, ou seja, regionalmente, é de imprescindível importância devido os padrões nutricionais encontrados na literatura terem sido obtidos em locais com particularidades de solo, clima e da própria variedade que, quando utilizados para outros ambientes, não fornecem diagnósticos exatos do estado nutricional.

4.4. Conclusões

A determinação do nível crítico de K em cana-de-açúcar tem ganhado destaque devido os diferentes tipos de solos possuírem capacidade diferenciada de fornecimento desse nutriente e, especialmente, as variedades possuírem capacidade de absorção e exigência nutricional dessemelhantes deste nutriente. Ademais, devido ao constante lançamento de novas variedades, o nível crítico de K no solo, torna-se um nível dinâmico. Nesse estudo, a aplicação de quantidades crescentes de K proporcionou aumento quadrático na produtividade agrícola e efeito linear no ATR da variedade RB992506 de cana-de-açúcar. A dose de máxima eficiência agrônômica foi de 150 kg ha^{-1} de K_2O e a produtividade de máxima eficiência agrônômica foi de 116 Mg ha^{-1} . A partir da dose de 150 kg ha^{-1} de K_2O houve decréscimo na produtividade agrícola devido à elevação da salinidade da solução do solo. A dose de máxima eficiência econômica foi de $11,34 \text{ kg ha}^{-1}$ e a produtividade de máxima eficiência econômica foi de 104 Mg ha^{-1} . Os níveis críticos no solo e planta foram de $0,18 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $9,53 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente, que servirá de parâmetro para avaliação da

fertilidade potássica dos solos arenosos cultivados com cana-de-açúcar no Nordeste, com ênfase para o estado da Paraíba.

Referências bibliográficas

- ASHRAF, M.; RAHMATULLAH; AHMAD, R.; AFZAL, M.; TAHIR, M. A.; KANWAL, S.; MAQSOOD, M. A. Potassium and Silicon Improve Yield and Juice Quality in Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) under Salt Stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Germany, v. 195, n. 4, p. 284-291, 2009.
- CAIONE, G.; SILVA, A. F.; REIS, L. L.; DALCHIAVON, F. C.; TEIXEIRA, M. T. R.; SANTOS, P. A. Doses de potássio em cobertura na primeira soca da cana-de-açúcar cultivada no norte Matogrossense. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 4, p. 572-580, 2011.
- CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F.; MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V, V. H.; BARROS, N. F. D.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. Cap.XIII. p. 769-850.
- CHALITA, R. **Calibração da adubação potássica através da análise química do solo para a cultura da cana-de-açúcar**. 1991. 75 f. Dissertação (mestrado), Esalq/USP, Piracicaba, 1991.
- Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília: Conab, v. 1. n. 3. 2016.
- DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. D.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. Cap.III. p. 91-132.
- DIAS, N. S.; BLANCO, F. F. Efeitos dos sais no solo e na planta. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. (Ed.). **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. Fortaleza/CE: INCT Sal, 2010. Cap.9. p. 129-140.
- DONAGEMMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

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

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; SANTOS, F. C. Potássio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. D.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. Cap.IX. p. 551-594.

FERREIRA, D. F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Symposium**, Lavras, v. 6, p. 36-41, 2008.

HARTT, C. E. Effect of potassium deficiency upon translocation of ^{14}C in attached blades and entire plants of sugarcane. **Plant Physiology**, United Kingdom, v. 44, p. 1461-1469, 1969.

HARTT, C. E. Effect potassium deficiency upon translocation of ^{14}C in detached blades of sugarcane. **Plant Physiology**, United Kingdom, v. 45, p. 183-187, 1970.

IPA. **Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco: 2ª aproximação**. Recife: Instituto Agrônomo de Pernambuco - IPA, 2008. 212 p.

KWONG, K. F. N. K. The effects of potassium on growth, development, yield and quality of sugarcane. In: Potash Research Institute of India (PRII) and International Potash Institute (IPI) Horgen. **Potassium for Sustainable Crop Production**. Switzerland, 2002. p. 430-444.

MEDEIROS, J. S.; OLIVEIRA, F. H. T.; SANTOS, H. C.; ARRUDA, J. A.; VIEIRA, M. D. S. Formas de potássio em solos representativos do Estado da Paraíba. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 45, n. 2, p. 417-426, 2014.

MELO, V. F.; CORRÊA, G. F.; MASCHIO, P. A.; RIBEIRO, A. N.; LIMA, V. C. Importancia das espécies minerais no potássio total da fração argila de solos do triângulo mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 807-819, 2003.

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

NASCIMENTO, M.; LAPIDO-LOUREIRO, F. E. D. V. O potássio na agricultura Brasileira: fontes e rotas alternativas. In: LAPIDO-LOUREIRO, F. E. D. V.; MELAMED, R.; FIGUEIREDO NETO, J. D. (Ed.). **Fertilizantes: agroindústria e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. Cap.9. p. 305-335.

OLIVEIRA, A. C. **Interação da adubação nitrogenada e molibídica em cana-de-açúcar**. (2012). 97 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2012.

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

OLIVEIRA, E. C. A. D.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I. D.; FREIRE, M. B. G. D. S.; SIMÕES NETO, D. E.; SILVA, S. A. M. D. 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.

OLIVEIRA, R. A.; DAROS, E; HOFFMANN, H. P (org.). **Liberção nacional de variedades RB de cana-de-açúcar**. 1. ed. Curitiba: graciosa, 2015. 72 p.

ORLANDO FILHO, J.; ZAMBELLO JÚNIOR, E.; RODELLA, A. A. Calibração de potássio no solo erecomendação de adubação para a cana-de-açúcar. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v. 97, n. 1, p. 18-24,1981.

OTTO, R.; VITTI, G. C.; LUZ, P. H. C. Manejo da adubação potássica na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1137-1145, 2010.

PEIXOTO, J. F. S.; GUERRA, H. O. C.; CHAVES, L. H. G. Alterações de atributos químicos do solo pela fertirrigação com nitroênio e potássio. **Agrapecuária técnica**, Areia, v. 27, n. 2, p. 69-76, 2006.

RAIJ, B VAN. Calibração de potássio trocável em solos para feijao, algodao e cana-de-açúcar. **Ciencia e Cultura**, Campinas,v. 26, n. 6, p. 575-576, 1974.

RAO, C. S.; REDDY, S. B.; KUNDU, S. Potassium nutrition and management in Indian agriculture: Issues and Strategies. **Indian Journal of Fertilisers**, India, v. 10, n. 5, p. 58-80, 2014.

REIS JR, R. A.; MONNERAT, P. H. Diagnose nutricional da cana-de-açúcar em campos dos Goytacazes (RJ). **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 367-372, 2002.

ROCHA, V. D. F.; SANTOS, L. A. D. L.; CABRAL, T. L. F.; MELO, F. D. A. D.; BARRETO, B. J. B. **Técnicas agrícolas sustentáveis para o cultivo da cana-de-açúcar**. Joao Pessoa, PB: ASPLAN, 2014.

RODELLA, A. A.; ZAMBELO JUNIOR, E.; ORLANDO FILHO, J. **Calibração das análises de fósforo e potássio do solo em cana-de-açúcar; 2ª aproximação**. São Paulo: STAB, v. 6, n. 28, p. 39-42, 1983.

SANTANA, M. J.; CARVALHO, J. A.; SOUZA, K. J.; SOUSA, A. M. G.; VASCONCELOS, C. L.; ANDRADE, L. A. B. Efeito da salinidade da água de irrigação na brotação e desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) e em solos com diferentes níveis texturais. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 31, n. 5, p. 1470-1476, 2007.

SCHULTZ, N.; LIMA, E.; PEREIRA, M. G.; ZONTA, E. Efeito residual da adubação da cana-planta e da adubação nitrogenada e potássica na cana-soca colhidas com e sem a queima da palhada. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 811-820, 2010.

SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; OLIVEIRA, E. C. A.; ROCHA, A. T. Adubação fosfatada para cana-de-açúcar em solos representativos para o cultivo da espécie no Nordeste brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 1, p. 73-81, 2015.

UCHÔA, S. C. P.; ALVES JÚNIOR, H. O.; ALVES, J. M. A.; MELO, V. F.; FERREIRA, G. B. Resposta de seis variedades de cana-de-açúcar a doses de potássio em ecossistema de cerrado de Roraima. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, n. 4, p. 505-513, 2009.

UCKER, F. E.; DE-CAMPOS, A. B.; HERNANI, L. C.; MACEDO, J. R.; SILVA MELO, A. Movimentação vertical do íon potássio em Neossolos Quartzarênicos sob cultivo com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1548-1556, 2016.

WANG, N.; HUA, H.; EGRINYA ENEJI, A.; LI, Z.; DUAN, L.; TIAN, X. Genotypic variations in photosynthetic and physiological adjustment to potassium deficiency in cotton (*Gossypium hirsutum*). **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, Canada, v. 110, p. 1-8, 2012.

WATANABE, K.; FUKUZAWA, Y.; KAWASAKI, S. I.; UENO, M.; KAWAMITSU, Y. Effects of Potassium Chloride and Potassium Sulfate on Sucrose Concentration in Sugarcane Juice Under Pot Conditions. **Sugar Tech**, India, 2015. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1007/s12355-015-0392-z>>

WIETHOLTER, S. Bases teóricas e experimentais de fatores relacionados com a disponibilidade de potássio do solo às plantas usando o trigo como referência. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1011-1021, 2007.

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

**5. CAPÍTULO III: BIOQUÍMICA DA CANA-DE-AÇÚCAR EM FASE DE
MATURAÇÃO FERTILIZADA COM POTÁSSIO**

BIOQUÍMICA DA CANA-DE-AÇÚCAR EM FASE DE MATURAÇÃO FERTILIZADA COM POTÁSSIO

Resumo

No ciclo fisiológico da cana-de-açúcar, a fase de maturação ocorre quando a planta cessa seu crescimento vegetativo e seu metabolismo se direciona para a produção e acúmulo de sacarose. Esta fase também coincide com o período de baixa precipitação pluviométrica e há ocorrência de déficit hídrico, que pode promover diversos efeitos negativos na planta, como aumento das EROs, que são moléculas com elevado potencial danoso para as estruturas celulares. O K possui importante papel sobre a tolerância das plantas ao déficit hídrico devido promover tolerância as EROs, além de importante papel sobre o metabolismo e translocação de carboidratos. O objetivo desse trabalho foi avaliar a bioquímica da cana-de-açúcar em fase de maturação submetida a doses crescentes de K_2O aplicadas no solo. Foi implantado um experimento em campo com seis doses de K_2O (0, 25, 50, 100, 200 e 250 $kg\ ha^{-1}$) em delineamento em blocos ao acaso com quatro repetições. Avaliou-se os teores de carboidratos, proteínas, prolina, clorofila A, B, total, a razão clorofila A/B e as enzimas do complexo antioxidativo CAT, SOD e APX. As doses de K_2O promoveram aumento dos teores de prolina, clorofila A, B e total até a dose de 150 $kg\ ha^{-1}$ de K_2O . A partir dessa dose houve decréscimo dos teores devido à elevação da salinidade do solo promovida pelo aumento do adubo aplicado. Não houve efeito das doses de K_2O sobre a atividade das enzimas do complexo antioxidativo, e também sobre os teores de carboidratos e proteínas.

Palavras-chave: *Saccharum spp.*. Pigmentos fotossintéticos. Enzimas do complexo oxidativo.

BIOCHEMISTRY OF SUGARCANE IN MATURATION PHASE FERTILIZED WITH POTASSIUM

Abstract

In sugarcane physiological cycle, the maturation phase occurs when the plant ceases its vegetative growth and its metabolism is directed towards the production and accumulation of sucrose. This phase also coincides with the period of low rainfall and there is occurrence of water deficit, which can promote several negative effects on the plant, such as increase of EROs, which are molecules with high harmful potential for the cellular structures. K has an important role on plant tolerance to water deficit because it promotes EROs tolerance, as well as important role on carbohydrate metabolism and translocation. The aim of this work was to evaluate the biochemistry of sugarcane in maturation phase submitted to increasing rates of K₂O applied to the soil. A field experiment with six rates of K₂O (0, 25, 50, 100, 200 and 250 kg ha⁻¹) was implanted in a randomized complete block design with four replicates. The contents of carbohydrates, proteins, proline, chlorophyll A, B, total, the chlorophyll A / B ratio and the enzymes of the CAT, SOD and APX antioxidative complex were evaluated. The rates of K₂O increased the contents of proline, chlorophyll A, B and total up to 150 kg ha⁻¹ of K₂O. From this rate there was a decrease of the contents due to the elevation of the salinity of the soil promoted by the increase of the applied fertilizer. There was no effect of K₂O rates on the antioxidative complex enzyme activity, and also on the carbohydrate and protein contents.

Keywords: *Saccharum* spp. Photosynthetic Pigments. Antioxidative Complex Enzymes.

5.1. Introdução

A cana-de-açúcar é uma cultura com elevada demanda pelo K (OLIVEIRA et al., 2010) e uma das culturas com maior consumo desse nutriente no Brasil. Estima-se que a cana-de-açúcar seja responsável pelo consumo de 15% de todo o adubo NPK no país (CELLA ; ROSSI, 2010). Além da elevada exigência nutricional dessa cultura, os solos brasileiros são, de forma geral, pouco férteis nesse nutriente, tornando a adubação com K indispensável para manutenção de produtividades elevadas e competitivas (MELO et al., 2003; ALVES et al., 2013).

O K possui importante função na ativação de diversos complexos enzimáticos, participando do metabolismo de carboidrato, proteína e proteção contra o estresse oxidativo (ROSETTO et al., 2008; RAO et al., 2014) e em especial, o K é um importante promotor da tolerância ao déficit hídrico (WANG et al., 2013; ANSCHÜTZ et al., 2014).

A fase de maturação da cana-de-açúcar corresponde ao período em que os processos fisiológicos e bioquímicos da planta estão direcionados para a síntese e o acúmulo de sacarose nos colmos. Neste período é necessária a ocorrência de déficit hídrico moderado (ANJOS e FIGUEIREDO, 2008). No Nordeste brasileiro, a fase de maturação ocorre entre os meses de setembro e dezembro, período característico pela redução significativa da precipitação pluviométrica e ocorrência de déficit hídrico (ABREU et al., 2013).

O déficit hídrico é mais severo em solos arenosos. No Nordeste, grande parte do cultivo de cana-de-açúcar ocorre em solos dos Tabuleiros Costeiros, que são arenosos e deficientes em K, exigindo elevadas fertilizações, que não garantem plantas bem nutridas em K na maturação, principalmente em regiões onde a precipitação pluviométrica é mais elevada no inverno. Portanto, estudos que avaliem os efeitos bioquímicos do K na maturação em cana-de-açúcar cultivada nessas regiões do Nordeste são importantes para se encontrar manejo alternativo de fertilização potássica, que garanta plantas bem nutridas nesse período do ciclo da cultura.

O déficit hídrico ocorre quando o teor de água na célula está abaixo do teor de máxima hidratação (TAIZ; ZEIGER, 2004). Dentre os efeitos na planta, o déficit hídrico provoca aumento de espécies reativas de oxigênio, diminuição da transpiração e da fotossíntese e, conseqüentemente, redução da produtividade ou crescimento da planta (TAIZ; ZEIGER, 2004; AOWN et al., 2012; SALES et al., 2013; HOLANDA et al., 2014).

A adubação potássica, até mesmo em quantidades elevadas que promovam “consumo de luxo”, é relatada na literatura como favorável à promoção da tolerância das plantas ao déficit hídrico (KAFKAFI, 1990; ZÖRB et al., 2014) e, deste modo, maior produtividade e/ou crescimento (UCHÔA et al., 2009; CAIONE et al., 2011; FLORES et al., 2012), reduzindo efeitos prejudiciais provocados por espécies reativas de oxigênio (WANG et al., 2013; AHMAD et al., 2014).

O K além desse efeito de elevar a tolerância ao estresse hídrico, comum e necessário na fase de maturação da cana-de-açúcar, e também contribuir para combater as espécies reativas de oxigênio advindas do estresse dessa fase do ciclo da cultura, exerce uma atividade importante nos complexos enzimáticos, especialmente no metabolismo de carboidratos e proteína. Assim, além de protetor dos estresses hídricos e oxidativos, é também um “carregador” de açúcares. Portanto, plantas bem nutridas em K nessa fase do ciclo da cultura, podem promover ganhos significativos de produtividade industrial, principalmente de açúcares redutores totais (ATR).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações bioquímicas da cana-de-açúcar em fase de maturação, submetida à adubação potássica em cultivo de sequeiro.

5.2. Material e Métodos

5.2.1. Caracterização do local do ensaio de campo

Foi instalado um campo experimental no município de Caaporã, Paraíba, Brasil, com coordenadas geográficas 7°30'30.194324" de Latitude Sul e 34°52' 33.169375" de Longitude Oeste. O município está a 37 m acima do nível do mar e apresenta clima Am, segundo a classificação climática de Köppen-Geigerem. O ensaio foi instalado no campo agrícola da Destilaria Tabu.

Na área do ensaio foram coletadas cinco amostras de solo nas profundidades 0,0-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60; 0,60-0,80; e 0,80-1,00 m para compor uma amostra composta e realizada análises químicas para avaliação da fertilidade [$\text{pH}_{\text{água}}$, P, Na^+ , K^+ , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$, Al^{3+} , (H+Al)]. Foram também determinados os teores de Zn, Cu, Mn, Fe o teor de C orgânico total (COT) (DONAGEMA et al., 2011). Com os resultados dessas análises foi calculada capacidade

de troca de cátions potencial ($CTC_{potencial}$) e efetiva ($CTC_{efetiva}$), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m).

Fisicamente o solo foi caracterizado pela granulometria, densidade das partículas, densidade do solo e porosidade total (DONAGEMA et al., 2011) (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização química e física do solo do ensaio de campo

Atributo	Profundidade (m)				
	0,0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1,0
pH _{água} (1:2,5)	4,7	4,4	4,0	4,0	4,0
P (mg dm ⁻³)	8,0	2,1	0	0	0
Na ⁺ (cmolcdm ⁻³)	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
K ⁺ (cmolcdm ⁻³)	0,12	0,01	0,01	0,01	0
Ca ²⁺ + Mg ²⁺ (cmolcdm ⁻³)	2,1	1,5	1,4	1,6	1,2
Al ³⁺ (cmolcdm ⁻³)	0,2	0,2	0,4	0,5	0,6
(H + Al) (cmolcdm ⁻³)	2,3	1,9	1,8	2,0	2,1
CTC _{efetiva} (cmolc dm ⁻³) ⁽¹⁾	2,4	1,7	1,8	2,1	1,8
CTC _{potencial} (cmolc dm ⁻³) ⁽²⁾	4,5	3,4	3,2	3,6	3,3
V (%) ⁽³⁾	48,4	44,5	44,1	44,7	36,7
m (%) ⁽⁴⁾	8,5	11,6	22,0	23,6	33,0
COT (g kg ⁻¹) ⁽⁵⁾	3,0	1,56	1,11	0,72	0,60
Fe (mg dm ⁻³)	88,3	92,96	120,44	99,02	82,44
Cu (mg dm ⁻³)	4,43	1,93	0,91	0,92	0,65
Zn (mg dm ⁻³)	1,25	1,93	2,42	1,71	2,45
Mn (mg dm ⁻³)	5,09	1,93	1,54	1,42	1,49
Areia (g kg ⁻¹)	84,52	72,92	66,18	53,94	54,54
Silte (g kg ⁻¹)	3,48	11,08	13,82	24,06	5,46
Argila (g kg ⁻¹)	12	16	20	22	40
Classe textural	Areia franca	Areia franca	Franco arenosa	Franco argiloarenosa	Franco argilo arenosa
Ds (Mg m ⁻³) ⁽⁶⁾	1,32	1,68	1,61	1,75	1,45
Dp (Mg m ⁻³) ⁽⁷⁾	2,82	2,73	2,72	2,80	2,76
Pt (%) ⁽⁸⁾	53,05	38,29	40,63	37,38	47,19

¹Capacidade de troca de cátions efetiva; ²Capacidade de troca de cátions potencial; ³Saturação por bases; ⁴Saturação por alumínio; ⁵Carbono orgânico total; ⁶Densidade do solo; ⁷Densidade das partículas; ⁸Porosidade total

A precipitação pluviométrica durante o ensaio experimental foi de 1.800 mm (Figura 1).

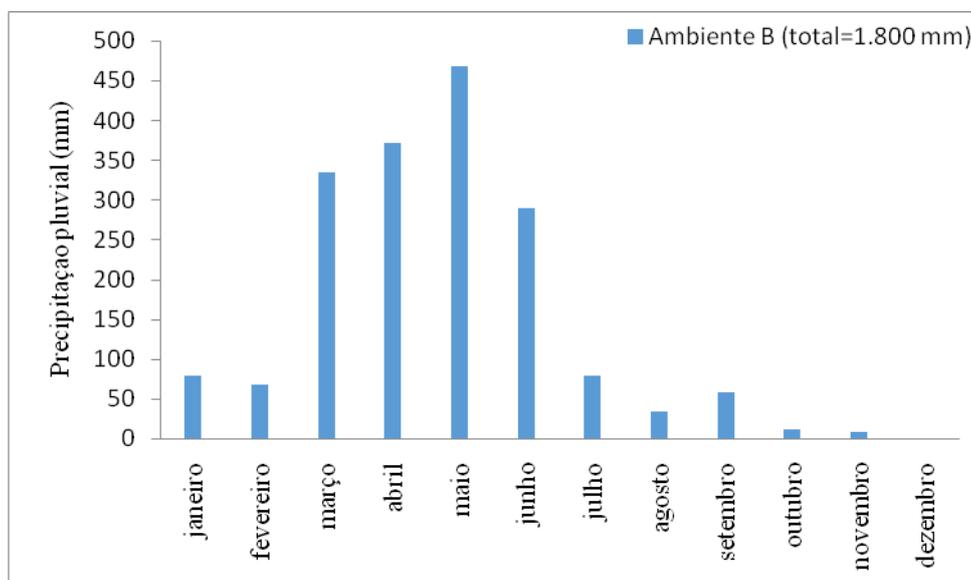


Figura 1. Precipitação pluviométrica durante o experimento

5.2.2. Ensaio experimental

O experimento foi implantado em blocos ao acaso e utilizada a variedade RB992506 que é uma das variedades mais recentemente liberadas pela Rede Interuniversitaria de Desenvolvimento do Setor Sucrialcooleiro (RIDESA) (OLIVEIRA, 2015). Foram aplicadas seis doses de K (0; 21; 41,5; 83; 166; e 207,5) que corresponderam a aproximadamente as seguintes doses de K_2O (0; 25; 50; 100; 200; e 250 $kg\ ha^{-1}$) com quatro repetições, totalizando 24 parcelas experimentais

As parcelas do experimento compreenderam seis linhas de plantio com 10,0 m de comprimento com espaçamento de 1,5 x 0,9 m, correspondendo a uma área total de 72 m^2 . A área útil correspondeu às quatro linhas centrais com exclusão de 1,0 m de cada lado da parcela, totalizando 37,6 m^2 de área útil.

O preparo do solo foi realizado com controle químico de plantas espontâneas, subsolagem, aragem e gradagem e, posterior, sulcagem do solo. O plantio foi realizado em 20 de Janeiro de 2016 e colhido em Dezembro (cana de ano). A cana-de-açúcar foi plantada distribuindo-se colmos no sulco de modo a coincidir a extremidade de um com a base do outro. Foram distribuídos aproximadamente 18 $Mg\ ha^{-1}$ de colmos, com posterior seccionamento de modo a se obter, em média, 24 gemas por metro linear.

O solo do ensaio do experimento foi corrigido, utilizando-se $1,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário dolomítico, com PRNT de 85%. A necessidade de calagem foi calculada pelo método da saturação por bases (IPA, 2008), elevando-se a saturação para 70%. Foi aplicado $1,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de gesso mineral na área experimental baseada na exportação de Ca pela cultura para quatro cultivos sucessivos (OLIVEIRA et al., 2010). Os corretivos foram aplicados a lanço em área total sem incorporação.

Foi realizada adubação de fundação no sulco de plantio com 60 kg ha^{-1} de N na forma de uréia + 200 g ha^{-1} de Mo (OLIVEIRA, 2012) e 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 com superfosfato triplo (SIMÕES NETO et al., 2015). O K foi aplicado conforme a diferenciação dos tratamentos, utilizando-se como fonte o cloreto de potássio. Foram aplicados também $2,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de Cu, 4 kg ha^{-1} de Zn, $5,2 \text{ kg ha}^{-1}$ de Mn na forma de sulfato (IPA, 2008) e $2,0 \text{ L ha}^{-1}$ de B, conforme manejo de adubação utilizado pela empresa. No plantio também foram aplicados fungicida ($0,5 \text{ L ha}^{-1}$), nematicida (5 L ha^{-1}) e cupinicida ($0,2 \text{ kg ha}^{-1}$) sobre os colmos, antes do fechamento dos sulcos de plantio.

5.2.3. Variáveis mensuradas

Aos nove meses após o plantio foram coletados o terço médio de 15 folhas índices ou diagnósticas (+1) por parcela, para determinação dos açúcares solúveis (carboidratos), proteína, prolina, enzimas do complexo antioxidativo e pigmentos foliares. As folhas foram coletadas, embrulhadas em papel alumínio e submergidas entre 10 a 20 segundos em nitrogênio líquido. Após a coleta de cada bloco, as amostras foram transferidas e armazenadas para caixa térmica contendo gelo.

5.2.3.1. Açúcares solúveis

Foram liofilizados 20 mg de tecido foliar e macerados em cadinho com adição de N líquido para obtenção de pó fino. Após obtenção do pó, as amostras foram maceradas com 2 mL de água destilada e, em seguida, adicionados mais 2 mL de água. As amostras foram agitadas em agitador horizontal por quatro vezes durante um minuto a cada 15 minutos. Em seguida, as amostras foram centrifugadas a 3.000 rpm por 15 minutos em temperatura ambiente. O sobrenadante foi coletado e armazenado em microtubos de 2mL e submetidos a nova centrifugação por 10 minutos a 6.000 rpm. O sobrenadante foi utilizado para

determinação dos açúcares. Utilizou-se 50 µL do sobrenadante + 450 µL de água destilada e adicionou-se 500 µL de fenol (5%) e 2,5 mL de H₂SO₄ concentrado. A mistura foi agitada em vortex por 10-20 segundos. Os tubos foram resfriados em bandeja com gelo e as leituras foram realizadas em espectrofotômetro à 490 nm (DUBOIS et al., 1956).

5.2.3.2. Proteína

Foram macerados 100 mg de tecido foliar com N líquido para obtenção de pó fino. O pó foi macerado com 2 mL de meio de reação (tampão TFK pH 7,5 + ascorbato de sódio+EDTA+triton X), em seguida foi adicionado 0,3 g de PVPP e novamente macerado até obtenção de extrato homogêneo. O extrato foi transferido para microtubos de 2mL e centrifugados por 15 minutos a 10.000 rpm a 4°C. O sobrenadante foi coletado e armazenado para análise de proteína. Para isso, 50 µL do extrato foram adicionados a 350 µL de água destilada e 2.000 µL de solução de Bradford e as leituras efetuadas em espectrofotômetro com comprimento de onda de 595 nm (BRADFORD, 1976).

5.2.3.3. Prolina

Foram liofilizadas 100 mg de folhas +1 e moídas até obtenção de pó fino. Em seguida foram adicionados nas amostras 8 mL de ácido sulfossalicílico (3%) mantendo-as sob agitação constante em mesa agitadora por uma hora. Após esse período, as amostras foram centrifugadas a 3.000 rpm por 10 minutos. O sobrenadante foi coletado e utilizado para determinação de prolina livre. Em um mL de extrato foram adicionados um mL de ninhidrina ácida e um mL de ácido acético glacial, sendo a mistura mantida em banho Maria a 100°C por uma hora. Após esse período, as amostras foram acondicionadas em banho de gelo até resfriamento e foi adicionado dois mL de tolueno. Em seguida o extrato foi agitado em vortex e a fase oleosa da parte superior formada foi coletada para leitura em espectrofotômetro a 520 nm (BATES et al., 1973).

5.2.3.4. Enzimas do complexo antioxidativo

As determinações de catalase (CAT) e ascorbatoperoxidase (APX) foram realizadas com o mesmo extrato utilizado para determinação de proteína. A atividade da APX foi

determinada em espectrofotômetro a 290 nm, utilizando cubeta de quartzo com leituras de 5 em 5 segundos, por 1 minuto. Para montagem da reação foram adicionados 334 µL de tampão TFK, 1566 µL de água, 20 µL de ascorbato de sódio, 20 µL de peróxido de hidrogênio (10 mM) e 60 µL do extrato (NAKANO e ASADA, 1981). Para a CAT a leitura foi em comprimento de onda de 240 nm em cubeta de quartzo com leituras de 5 em 5 segundos, por um minuto. O extrato de reação foi montado com 334 µL de tampão TFK, 1356 µL de água, 250 µL de peróxido de hidrogênio (100 mM) e 60 µL de extrato (HAVIR; MCHALE, 1987).

A atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) foi determinada em extrato obtido pela maceração de 300 mg de folha +1 com 2 mL de extrator TFK pH 7,8 em espectrofotometro a 560 nm. Após maceração, as amostras foram centrifugadas por 15 minutos a 15.000 rpm a 4°C. Nas alíquotas de 50 µL do sobrenadante foram adicionadas 2,95 mL de meio de reação (tampão TFK pH 7,8+EDTA 100 mM+NBT 75 µM+ metionina 13 mM+riboflavina 2 µM). Após a formação da mistura, as amostras foram acondicionadas em caixa com luz fluorescente por 4 minutos (GIANNOPOLITIS; RIES, 1977).

5.2.3.5. Análise de pigmentos foliares

As folhas +1 de cada parcela foram coletadas e analisadas para os teores de Clorofila a, Clorofila b, Clorofila total e carotenóides. Foram incubados 50 mg de tecido foliar por 24 horas em geladeira com 5 mL de acetona 80% e determinados em espectrofotômetro a 480 nm (carotenóides), 645 nm (clorofila *b*) e 663 nm (clorofila *a*) (HENDRY; GRIME, 1993).

5.2.4. Análises estatísticas

Os dados das variáveis dependentes foram submetidos à análise de variância e regressão. Utilizou-se o software SISVAR 5.8 (FERREIRA, 2008).

5.3. Resultados e discussão

5.3.1. Carboidrato e Proteína

Os carboidratos e as proteínas não foram influenciados pelas doses de K₂O aplicadas no solo ($p>0,05$) (Tabela 2), apesar da função desse nutriente no metabolismo de proteínas e carboidratos ser amplamente difundido na literatura (ROSETTO et al., 2008; RAO et al., 2014). Adicionalmente, é importante ressaltar que o ATR aumentou significativamente com as quantidades crescentes de K₂O aplicadas (Figura 3B do Capítulo II), porém nem o efeito salino das maiores quantidades de K₂O aplicadas (Figura 4 do Capítulo II) influenciaram na síntese de carboidratos e proteínas (Tabela 2).

Tabela 2. Açúcares solúveis (carboidratos) e proteínas em folha índice de plantas de cana-de-açúcar em função do potássio aplicado no solo, análise de regressão e coeficientes de variação dos dados

Potássio (K ₂ O)	Carboidrato	Proteína
	mg g ⁻¹ MS ⁽¹⁾	mg g ⁻¹ MF ⁽²⁾
kg ha ⁻¹		
0	3,80	29,55
25	3,67	30,98
50	3,39	26,65
100	3,79	33,07
200	3,54	32,51
250	3,63	29,40
	F regressão	
Regressão Linear	0,06ns	0,25ns
Regressão Quadrática	0,07ns	0,70ns
C.V. (%) ⁽³⁾	13,49	16,94

¹Matéria seca; ²Matéria fresca; ³Coefficiente de variação = Desvio padrão/Média x 100.

^{ns}Não significativo

5.3.2. Aminoácidos e pigmentos foliares

A análise de regressão realizada entre as variáveis bioquímicas e as doses de K₂O aplicadas demonstrou efeito significativo ($p<0,05$) para as variáveis prolina, clorofila A, B, total e carotenóides (Tabela 3).

Tabela 3. Aminoácidos (Prolina) e pigmentos foliares em folha índice de plantas de cana-de-açúcar em função do potássio aplicado no solo, análise de regressão e coeficientes de variação dos dados

Potássio (K ₂ O)	Aminoácidos e pigmentos foliares				
	Prolina	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total	Carotenóide
kg ha ⁻¹	μmol mg ⁻¹ MS ⁽¹⁾	mg g ⁻¹ MF			μmol mg ⁻¹ MF ⁽²⁾
0	0,45	0,48	0,15	0,63	0,21
25	0,39	0,62	0,19	0,82	0,27
50	0,57	0,69	0,21	0,90	0,29
100	0,86	0,78	0,25	1,03	0,33
200	0,49	0,62	0,20	0,82	0,28
250	0,58	0,49	0,15	0,65	0,22
		F regressão			
Regressão Linear	0,81ns	0,17ns	0,05ns	0,14ns	0,03ns
Regressão Quadrática	6,08*	6,61*	7,58*	6,88*	7,83*
C.V. (%) ⁽³⁾	33,02	30,77	30,32	30,55	25,37

¹Matéria seca; ²Matéria fresca; ³Coeficiente de variação = Desvio padrão/Média x 100.

*Significativo a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo.

A prolina é um dos solutos acumulados pelas plantas em situações de estresse, como o hídrico, salino e oxidativo, a fim de manter a hidratação celular e não comprometer o metabolismo enzimático. O ajuste osmótico tem a finalidade de reduzir o potencial hídrico celular sem que ocorra perda do turgor das células, ou seja, consiste no aumento de solutos de modo que seu potencial hídrico seja mais negativo do que o potencial hídrico do solo. Além da prolina, outros solutos como açúcares, ácidos orgânicos, aminoácidos e íons inorgânicos, principalmente o K, atuam no ajuste osmótico (TAIZ; ZEIGER, 2004; AHMAD et al., 2014; GUPTA; HUANG, 2014).

Na célula, a elevação das concentrações de íons inorgânicos pode ser prejudicial à atividade das enzimas situadas no citosol, por isso os íons inorgânicos do ajuste osmótico são armazenados no vacúolo. No entanto, para preservar o equilíbrio do potencial hídrico dentro da célula, após acúmulo de íons no vacúolo, compostos orgânicos que não interferem no metabolismo celular, também denominado de solutos compatíveis, (prolina, sorbitol, manitol e glicina betaína) devem ser acumulados no citosol (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Nesse estudo observou-se efeito quadrático significativo ($p < 0,05$) para as doses de K_2O aplicadas e o teor de prolina (Figura 2), sendo constatado aumento dos teores de prolina até a dose de 135 kg ha^{-1} e em seguida redução do teor desse aminoácido.

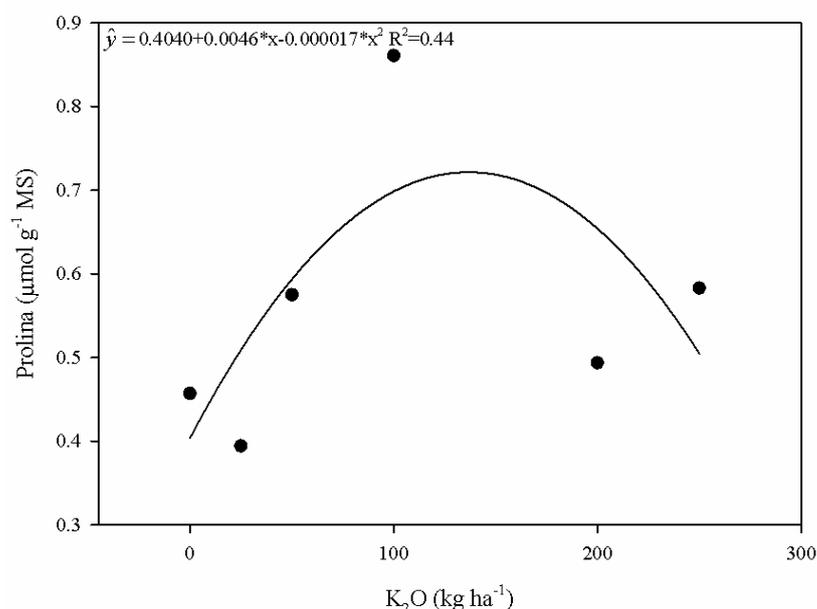


Figura 2. Teor de prolina em plantas de cana-de-açúcar em função do potássio aplicado no solo

O aumento do teor de prolina na folha da planta pela aplicação de doses de K_2O foi relatado em arroz cultivado em campo, até a dose de 160 kg ha^{-1} , e esse aumento foi atribuído ao estresse salino promovido pelo fertilizante potássico (ZAIN e ISMAIL, 2016). Nesse estudo, as doses de K_2O aumentaram linearmente a CE do solo (Figura 4 do Capítulo II) e o aumento chegou próximo a $1,7 \text{ dSm}^{-1}$, limite de tolerância à salinidade para a cana-de-açúcar (DIAS; BLANCO, 2010). Uma das estratégias das plantas para superar o estresse salino e, conseqüentemente manter a produtividade, consiste no acúmulo de prolina na folha (HUANG et al., 2013; PŁAŻEK et al., 2014; CARVALHO et al., 2016). No entanto, a partir da dose de 135 kg ha^{-1} de K_2O houve decréscimo no teor de prolina (Figura 2). Concomitantemente, a partir da dose de 150 kg ha^{-1} de K_2O houve decréscimo na produtividade agrícola da cana-de-açúcar (Figura 3 do capítulo II). Isso pode ser o limite da quantidade de K que deve ser utilizada na adubação para que a osmoproteção promovida pela prolina seja inibida.

Como observado para a prolina, as doses de K_2O promoveram comportamento quadrático significativo ($p < 0,05$) para os pigmentos foliares (Figura 3). Nas doses iniciais houve incremento na concentração dos pigmentos, e a partir da dose de 125 kg ha^{-1} para

clorofila A e B, 147 kg ha⁻¹ para clorofila total e 128 kg ha⁻¹ para carotenóides houve redução nos teores.

Em estudo sobre o efeito da salinidade da água de irrigação em feijão caupi, foi observado que os dados dos teores de clorofila b, total e carotenóide tiveram comportamento quadrático em relação a CE da água de irrigação, sendo que houve aumento dos teores desses pigmentos até a CE média de 3 dSm⁻¹ e a partir desse valor os teores diminuíram (FURTADO et al., 2014). Nesse estudo, o aumento da dose de K₂O promoveu elevação linear da CE do solo até 1,65 dSm⁻¹ na camada superficial (Tabela 4 e Figura 4 do Capítulo II), sendo que o limite de tolerância da CE do solo da cana-de-açúcar é de 1,7 dSm⁻¹(DIAS; BLANCO, 2010), que pode ter proporcionado redução nos teores dos pigmentos foliares (Figura 3).

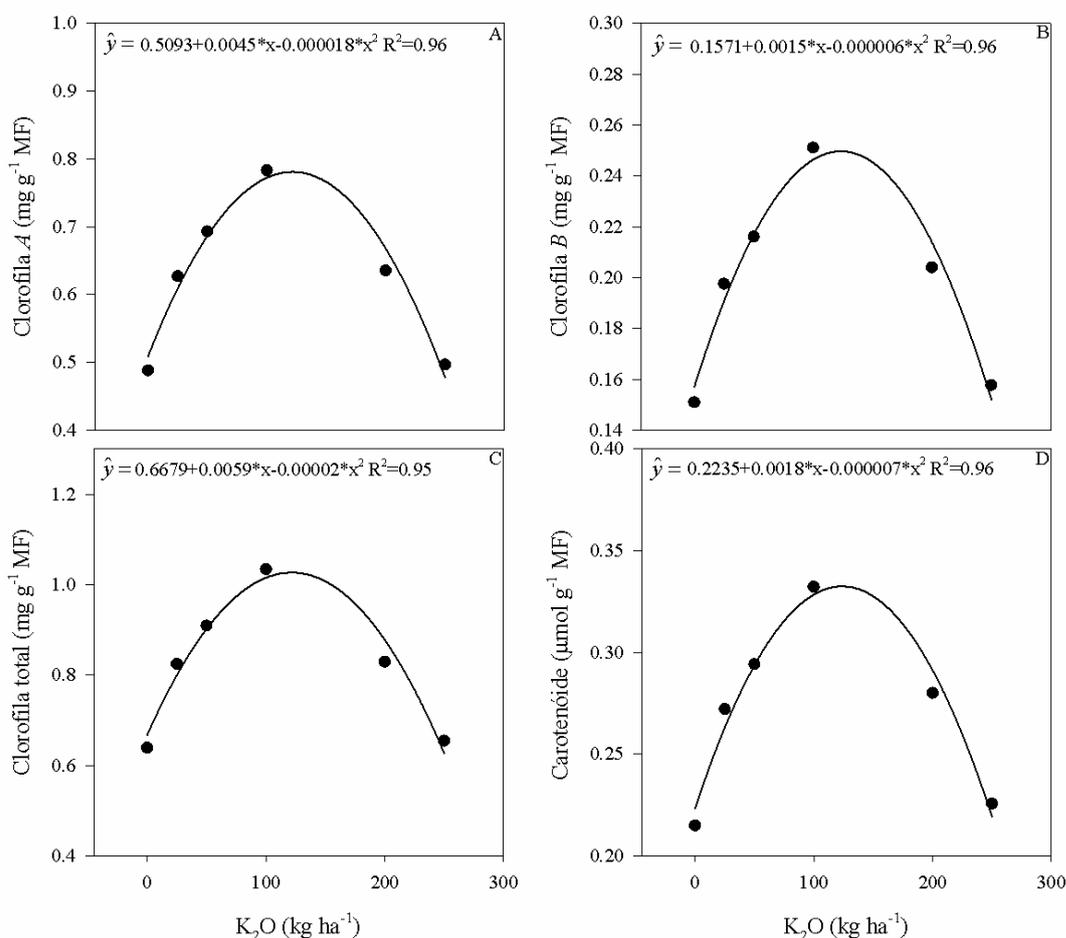


Figura 3. Teor de clorofila A (A), clorofila B (B), clorofila total (C) e carotenoides (D) em plantas de cana-de-açúcar em função do potássio aplicado no solo

Em experimento com sorgo e três níveis de salinidade foi observado que o aumento da salinidade reduziu os teores de clorofila a, b, total e de carotenóides, sendo esse efeito

ocasionado pela redução da atividade de enzimas responsáveis pela síntese de pigmentos fotossintéticos (KUMARI et al., 2016), bem como devido ao efeito tóxico dos sais que promovem a clorose foliar via estimulação da atividade de clorofilases (SILVEIRA et al., 2010).

A prolina possui importante função na osmoproteção das plantas, em especial, para as estruturas das macromoléculas, como os cloroplastos (SILVEIRA et al., 2010). Nesse estudo se observou comportamento semelhante entre o teor de prolina (Figura 2) e os teores de clorofila a, b, total e carotenóide (Figura 3), sugere que a prolina exerce uma função primordial sobre a estabilidade dos pigmentos foliares.

Outros estudos observaram que a deficiência de K promoveu menor concentração de clorofila em plantas (JIN et al., 2011; CAVALCANTE et al., 2015) e, conseqüentemente, diminuição na fotossíntese. Nesse estudo, observou-se aumento dos teores dos pigmentos foliares pelo incremento das quantidades de K até 150 kg ha⁻¹ (Figura 3). A partir dessa quantidade, houve redução dos teores dos pigmentos devido ao efeito das elevadas quantidades de K sob a elevação da CE do solo (Figura 4 do Capítulo II), e conseqüentemente efeito tóxico da salinidade sobre a degradação dos pigmentos (SILVEIRA et al., 2010).

5.3.3. Enzimas antioxidativas

Apesar da importante função do K sobre o status oxidativo celular, nas condições de campo em que esse experimento foi realizado, as quantidades de K não promoveram efeito significativo ($p > 0,05$) sobre as enzimas do complexo antioxidativo SOD, CAT e APX (Figura 4).

Tabela 4. Enzimas do complexo antioxidativo em folha índice de plantas de cana-de-açúcar em função do potássio aplicado no solo, análise de regressão e coeficientes de variação dos dados

Potássio (K ₂ O)	Enzimas do complexo antioxidativo		
	CAT ⁽¹⁾	APX ⁽²⁾	SOD ⁽³⁾
kg ha ⁻¹	Unidades min ⁻¹ mg ⁻¹ proteína		Unidades mg ⁻¹ proteína
0	3,37	1,23	63,48
25	2,61	1,18	64,57
50	3,32	1,42	67,28
100	3,33	1,18	53,85
200	2,91	1,32	55,80
250	3,33	3,47	64,90
	F regressão		
Regressão Linear	0,09ns	2,70ns	0,05ns
Regressão Quadrática	0,09ns	1,38ns	0,26ns
C.V. (%) ⁽⁴⁾	11,93	108,21	48,42

¹Catalase; ²Ascorbato peroxidase; ³Superóxido dismutase; ⁴Coefficiente de variação = Desvio padrão/Média x 100; ^{ns}Não significativo

As enzimas antioxidativas (SOD, CAT e APX) são responsáveis pela eliminação das espécies reativas de oxigênio (EROs) geradas em quantidades elevadas quando as plantas passam por situações de estresse (KARUPPANAPANDIAN et al., 2011; BARBOSA et al., 2014). Na literatura relata-se que quantidades crescentes de K podem diminuir a atividade dessas enzimas e promover maior tolerância aos estresses pela planta (WARAICH et al., 2011; WANG et al., 2013). Assim, como a deficiência de K pode aumentar a atividade dessas enzimas, a fim de compensar a sua função sobre a eliminação das EROs (AHMAD et al., 2014).

Em estudo com quantidades crescentes de K e estresse hídrico no arroz foi observado que a dose inicial de 80 kg ha⁻¹ de K₂O promoveu aumento da atividade da CAT, contudo, as doses subsequentes de 120 e 160 kg ha⁻¹ promoveram diminuição da atividade dessa enzima (ZAIN; ISMAIL, 2016). Contudo, nas condições desse estudo as quantidades de K₂O aplicadas não contribuíram para a diminuição da atividade dessa enzima e diminuição do estresse oxidativo.

5.4. Conclusão

Nesse estudo observou-se que a aplicação de quantidades crescentes de K_2O promoveu aumento significativo nos teores de prolina e dos pigmentos foliares clorofila *a*, *b*, total e carotenóides. No entanto, a partir dessa quantidade houve decréscimo dos teores devido ao aumento da condutividade elétrica do solo. Apesar da importante função do K sobre o metabolismo de proteínas e carboidratos, as quantidades aplicadas não promoveram efeitos significativos nesses compostos, bem como a atividade das enzimas antioxidativas também não foi afetada. Deste modo, na fase de maturação, a adubação potássica promoveu aumento dos teores de pigmentos foliares e da prolina até a dose de 125 e 135 kg ha⁻¹ de K_2O , respectivamente, mas não promoveu aumento dos teores foliares de proteínas, carboidratos e redução da atividade das enzimas antioxidativas, indicando que nessas condições as doses de K_2O não promoveram aumento da produção de açúcares e da proteção antioxidativa.

Referências bibliográficas

- ABREU, M. L.; SILVA, M. D. A.; TEODORO, I.; HOLANDA, L. A.; SAMPAIO NETO, G. D. Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Bragantia**, Campinas, v. 72, p. 262-270, 2013.
- AHMAD, P.; ASHRAF, M.; HAKEEM, K. R.; AZOOZ, M.; RASOOL, S.; CHANDNA, R.; AKRAM, N. A. Potassium starvation-induced oxidative stress and antioxidant defense response in *Brassica juncea*. **Journal of Plant Interactions**, Turin, v. 9, n. 1, p. 1-9, 2014.
- ALVES, M. J. F.; MELO, V. F.; REISSMANN, C. B.; KASEKER, J. F. Reserva mineral de potássio em Latossolo cultivado com *Pinus taeda* L. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1599-1610, 2013.
- ANJOS, I. A.; FIGUEIREDO, P. A. M. Aspectos fitotécnicos do plantio. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: IAC, 2008. Cap.27. p. 585-598.
- ANSCHÜTZ, U.; BECKER, D.; SHABALA, S. Going beyond nutrition: regulation of potassium homeostasis as a common denominator of plant adaptive responses to environment. **Journal of Plant Physiology**, Germany, v. 171, n. 9, p. 670-687, 2014.

AOWN, M.; RAZA, S.; SALEEM, M. F.; ANJUM, S. A.; KHALIQ, T.; WAHID, A. M. Foliar application of potassium under water deficit conditions improved the growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). **The Journal of Animal and Plant Science**, Kenya, v. 22, n. 2, p. 431-437, 2012.

BARBOSA, M. R.; SILVA, M. M. A.; WILLADINO, L. G.; ULISSES, C.; CAMARA, T. R. Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 3, p. 453-460, 2014.

BATES, L.; WALDREN, R.; TEARE, I. Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and Soil**, Australia, v. 39, n. 1, p. 205-207, 1973.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical biochemistry**, United States of America, v. 72, n. 1-2, p. 248-254, 1976.

CAIONE, G.; SILVA, A. F.; REIS, L. L.; DALCHIAVON, F. C.; TEIXEIRA, M. T. R.; SANTOS, P. A. Doses de potássio em cobertura na primeira soca da cana-de-açúcar cultivada no norte Matogrossense. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 4, p. 572-580, 2011.

CARVALHO, L. M. D.; CARVALHO, H. W. L. D.; OLIVEIRA, I. R. D.; RANGEL, M. A. S.; SANTOS, V. D. S. Productivity and drought tolerance of cassava cultivars in the Coastal Tablelands of Northeastern Brazil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 46, p. 796-801, 2016.

CAVALCANTE, V. S.; PRADO, R. M.; ALMEIDA, H. J.; CRUZ, F. J. R.; SANTOS, D. M. M. Gaseous exchanges, growth and foliar anatomy of sugarcane plants grown in potassium (K) deprived nutrient solution. **Australian journal of Crop Science**, Lismore, v. 9, n. 7, p. 577-584, 2015.

CELLA, D.; ROSSI, M. C. L. Análise do mercado de fertilizantes no Brasil. **Interface tecnológica**, Taquaratinga, v. 7, n. 1, p. 42-52, 2010.

DIAS, N. S.; BLANCO, F. F. Efeitos dos sais no solo e na planta. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. (Ed.). **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. Fortaleza/CE: INCT Sal, 2010. Cap.9. p. 129-140.

DUBOIS, M.; GILLES, K. A.; HAMILTON, J. K.; REBERS, P.; SMITH, F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**, Illinois, v. 28, n. 3, p. 350-356, 1956.

DONAGEMMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 225 p.

FERREIRA, D. F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Symposium**, Lavras, v. 6, p. 36-41, 2008.

FLORES, R. A.; PRADO, R. M.; POLITI, L. S.; ALMEIDA, T. B. F. Potássio no desenvolvimento inicial da soqueira de cana crua. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiania, v. 42, n. 1, p. 106-111, 2012.

FURTADO, G. F.; SOUSA JUNIOR, J. R.; XAVIER, D. A.; ANDRADE, E. M. G.; SOUSA, J. R. M. Pigmentos fotossintéticos e produção de feijão (*Vigna unguiculada* L. Walp) sob salinidade e adubação nitrogenada. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 9, n. 2, p. 291-299, 2014.

GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide dismutases I. Occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, United Kingdom, v. 59, n. 2, p. 309-314, 1977.

GUPTA, B.; HUANG, B. Mechanism of Salinity Tolerance in Plants: Physiological, Biochemical, and Molecular Characterization. **International Journal of Genomics**, United States of America, v. 2014, p. 18, 2014.

HAVIR, E. A.; MCHALE, N. A. Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves. **Plant Physiology**, United Kingdom, v. 84, n. 2, p. 450-455, 1987.

HENDRY, G. A.; GRIME, J. P. **Methods in comparative plant ecology: a laboratory manual**. Springer Science & Business Media, 1993.

HOLANDA, L. A.; SANTOS, C. M.; SAMPAIO NETO, G. D.; SOUSA, A. P.; SILVA, M. A. Variáveis morfológicas da cana-de-açúcar em função do regime hídrico durante o desenvolvimento inicial. **Irriga**, Botucatu, v. 19, n. 4, p. 573-584, 2014.

HUANG, Z.; ZHAO, L.; CHEN, D.; LIANG, M.; LIU, Z.; SHAO, H.; LONG, X. Salt Stress Encourages Proline Accumulation by Regulating Proline Biosynthesis and Degradation in Jerusalem Artichoke Plantlets. **PLoS ONE**, Germany, v. 8, n. 4, p. e62085, 2013.

IPA. **Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco: 2ª aproximação**. Recife: Instituto Agrônomo de Pernambuco - IPA, 2008. 212 p.

JIN, S. H.; HUANG, J. Q.; LI, X. Q.; ZHENG, B. S.; WU, J. S.; WANG, Z. J.; LIU, G. H.; CHEN, M. Effects of potassium supply on limitations of photosynthesis by mesophyll diffusion conductance in *Carya cathayensis*. **Tree Physiology**, United States of America, v. 31, n. 10, p. 1142-1151, 2011.

KAFKAFI, U. The functions of plant K in overcoming environmental stress situations. In: **Proceedings** of the 22nd colloquium of the international potassium institute, Soligorsk, USSR. International potash institute, 1990. p.81-94.

KARUPPANAPANDIAN, T.; MOON, J.-C.; KIM, C.; MANOHARAN, K.; KIM, W. Reactive oxygen species in plants: their generation, signal transduction, and scavenging mechanisms. **Australian journal of Crop Science**, Lismore, v. 5, n. 6, p. 709-725, 2011.

KUMARI, P.; ARYA, S.; PAHUJA, S.; JOSHI, U.; SHARMA, S. Evaluation of forage sorghum genotypes for chlorophyll content under salt stress. **International Journal of Sciences, Environment and Technology**, India, v. 5, n. 3, p. 1200-1207, 2016.

MELO, V. F.; CORRÊA, G. F.; MASCHIO, P. A.; RIBEIRO, A. N.; LIMA, V. C. Importancia das espécies minerais no potássio total da fração argila de solos do triangulo mineiro. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo** Viçosa, v. 27, p. 807-819, 2003.

NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Plant and cell physiology**, Japan, v. 22, n. 5, p. 867-880, 1981.

OLIVEIRA, A. C. **Interação da adubação nitrogenada e molíbdica em cana-de-açúcar**. (2012). 97 f. Tese (Doutorado em Ciências do solo), Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2012.

OLIVEIRA, E. C. A. D.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I. D.; FREIRE, M. B. G. D. S.; SIMÕES NETO, D. E.; SILVA, S. A. M. D. 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.

OLIVEIRA, R. A; DAROS, E; HOFFMANN, H. P (org.). **Liberção nacional de variedades RB de cana-de-açúcar**. 1. ed. Curitiba: graciosa, 2015. 72 p.

PLAŽEK, A.; DUBERT, F.; KOŚCIELNIAK, J.; TATRZAŃSKA, M.; MACIEJEWSKI, M.; GONDEK, K.; ŻUREK, G. Tolerance of *Miscanthus × giganteus* to salinity depends on initial weight of rhizomes as well as high accumulation of potassium and proline in leaves. **Industrial Crops and Products**, France, v. 52, p. 278-285, 2014.

RAO, C. S.; REDDY, S. B.; KUNDU, S. Potassium nutrition and management in Indian agriculture: Issues and Strategies. **Indian Journal of Fertilisers, India**, v. 10, n. 5, p. 58-80, 2014.

ROSETTO, 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/SP: Instituto Agronomico, 2008. Cap.12. p. 289-312.

SALES, C. R. G.; RIBEIRO, R. B.; SILVEIRA, J. A. G.; MACHADO, E. C.; MARTINS, M. O.; LAGÔA, A. M. M. A. Superoxide dismutase and ascorbate peroxidase improve the recovery of photosynthesis in sugarcane plants subjected to water deficit and low substrate temperature. **Plant Physiology and Biochemistry**, Italy, v. 73, p. 326-336, 2013.

SILVEIRA, J. A. G.; SILVA, S. L. F.; SILVA, E. N.; VIÉGAS, R. A. Mecanismos biomoleculares envolvidos com a resistencia ao estresse salino em plantas In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. (Ed.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. Fortaleza/CE: INCT sal, 2010. Cap.11. p. 161-180.

SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; OLIVEIRA, E. C. A.; ROCHA, A. T. Adubação fosfatada para cana-de-açúcar em solos representativos para o cultivo da espécie no Nordeste brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 1, p. 73-81, 2015.

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

UCHÔA, S. C. P.; ALVES JÚNIOR, H. O.; ALVES, J. M. A.; MELO, V. F.; FERREIRA, G. B. Resposta de seis variedades de cana-de-açúcar a doses de potássio em ecossistema de cerrado de Roraima. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 40, n. 4, p. 505-513, 2009.

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

WARAICH, E. A.; AHMAD, R.; ASHRAF, M. Y. Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. **Australian journal of Crop Science**, Lismore, v. 5, n. 6, p. 764-777, 2011.

ZAIN, N. A. M.; ISMAIL, M. R. Effects of potassium rates and types on growth, leaf gas exchange and biochemical changes in rice (*Oryza sativa*) planted under cyclic water stress. **Agricultural Water Management**, New Zealand, v. 164, p. 83-90, 2016.

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

6. CAPÍTULO IV: BIOQUÍMICA DA CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA SOB DEFICIT HÍDRICO E EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE POTÁSSIO

BIOQUÍMICA DA CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA SOB DEFICIT HÍDRICO E EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE POTÁSSIO

Resumo

O déficit hídrico promove alterações bioquímicas nas plantas que envolvem a superprodução de EROs, produção de prolina e degradação de pigmentos fotossintéticos. As plantas, mesmo sendo da mesma espécie, possuem capacidade diferenciada para tolerar o déficit hídrico. O nutriente K também possui importante função sobre a tolerância das plantas ao déficit hídrico, principalmente devido ao seu papel osmoregulador e ativador enzimático. O objetivo do presente estudo foi avaliar o efeito da aplicação de concentrações crescentes de K em solução nutritiva em duas variedades de cana-de-açúcar e em duas condições de hidratação das plantas. O experimento foi implantado em blocos ao acaso em arranjo fatorial (5x2x2), com quatro repetições, sendo cinco concentrações de K em solução nutritiva (0; 0,5; 1; 2 e 6 mmol L⁻¹), duas variedades de cana-de-açúcar (RB92579 e RB992506) e duas condições de hidratação das plantas (hidratadas e suspensão da hidratação por 48h). Foram avaliados os teores foliares de carboidratos, proteínas, prolina, pigmentos fotossintéticos, atividade de enzimas antioxidativas (CAT, SOD e APX) e a produção de matéria seca. As concentrações crescentes de K promoveram redução da atividade das enzimas CAT e SOD e aumentaram os teores foliares de proteínas e da massa seca das plantas. A variedade RB992506 apresentou menor atividade das enzimas CAT e APX e maiores teores de pigmentos fotossintéticos, de carboidratos e de massa seca do que a variedade RB92579. As condições de hidratação, assim como suas interações com as concentrações de K e variedades não promoveram efeito significativo sobre as variáveis estudadas. De forma geral, a deficiência nutricional de K promoveu estresse oxidativo sinalizado pelo aumento da atividade das enzimas CAT e SOD e a variedade RB992506 apresentou-se promissora para o plantio e substituição da variedade RB92579, devido a maior tolerância a deficiência nutricional de K, maior capacidade de detoxificação de EROs, maior teor de pigmentos foliares e maior capacidade de produção de matéria seca.

Palavras-chave: *Saccharum* spp.. EROs. Deficiência de potássio.

BIOCHEMISTRY OF SUGAR CANE CULTIVATED UNDER WATER DEFICIT AND DIFFERENT POTASSIUM CONCENTRATIONS

Abstract

Water deficit promotes biochemical changes in plants that involve the overproduction of EROs, proline production and degradation of photosynthetic pigments. Plants, even of the same species, have different capacity to tolerate the water deficit. The nutrient K also has an important function on the tolerance of plants to the water deficit, mainly due to its role as the osmoregulator and enzymatic activator. The aim of the present study was to evaluate the effect of the application of increasing concentrations of K in nutrient solution in two sugarcane varieties and in two hydration conditions. The experiment was performed in a randomized block design in a factorial arrangement (5x2x2), with four replications, five K concentrations in nutrient solution (0, 0.5, 1, 2 and 6 mmol L⁻¹), two sugarcane varieties (RB92579 and RB992506) and two hydration conditions (hydrated and suspension of hydration for 48h). Carbohydrate, protein, proline, photosynthetic pigments, antioxidative enzyme activity (CAT, SOD and APX) and dry matter production were evaluated. Increasing concentrations of K promoted reduced activity of CAT and SOD enzymes and increased foliar protein and plant dry mass. The variety RB992506 presented lower activity of CAT and APX enzymes and higher levels of photosynthetic pigments, carbohydrates and dry mass than the variety RB92579. The hydration conditions, as well as their interactions with K concentrations and varieties, did not have a significant effect on the studied variables. In general, the nutritional deficiency of K promoted oxidative stress signaled by the increase of the activity of CAT and SOD enzymes and the variety RB992506 presented promising for the planting and substitution of variety RB92579, due to the greater tolerance to K nutritional deficiency, higher detoxification capacity of ROS, higher leaf pigment content and higher dry matter production capacity.

Keywords: *Saccharum* spp. ROS. Potassium Deficiency.

6.1. Introdução

K é um nutriente com grande importância bioquímica nas plantas (WANG et al., 2013; ANSCHÜTZ et al., 2014; RAO et al., 2014). Particularmente para cana-de-açúcar, o K é muito requerido e sua absorção supera a dos demais nutrientes, inclusive N (OLIVEIRA et al., 2010).

Durante o perfilhamento e crescimento, o N é muito requerido, porém sua atuação só é maximizada em plantas bem nutridas com K, pela sua capacidade de regular a abertura e fechamento dos estômatos e manter o turgor celular, favorecendo uma maior concentração de carboidratos e permitindo uma adequada assimilação de N nos aminoácidos e proteínas. Na maturação, o K é responsável pelo transporte dos açúcares por suas funções no metabolismo dos carboidratos e proteínas, além de regular o estresse hídrico, comum nessa fase do ciclo da cana-de-açúcar, não permitindo que as plantas diminuam o turgor celular. Concomitantemente, é importante na diminuição do estresse oxidativo, causados pelo déficit hídrico.

A quantidade absorvida de K e o incremento na produtividade pela aplicação de quantidades crescentes de K dependem da variedade (UCHÔA et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2010). Variedades ou cultivares de uma mesma espécie podem apresentar características genotípicas diferentes para absorção de K (WANG et al., 2012) e maior ou menor tolerância a estresses abióticos (SANTOS et al., 2014).

O K na planta exerce muitas funções, como ativação de diversos complexos enzimáticos responsáveis pelo metabolismo de carboidratos, proteínas e detoxificação de enzimas do complexo oxidativo (EROs) (WANG et al., 2013). A deficiência de K nas plantas causa aumento da geração de EROs, que prejudica o desenvolvimento da planta, devido ao efeito tóxico que essas moléculas exercem, principalmente, nas membranas celulares (WANG et al., 2012; AHMAD et al., 2014). Adicionalmente, o aumento das EROs, devido a deficiência nutricional de K, pode ocasionar danos oxidativos nos pigmentos foliares e diminuir seus teores (CAVALCANTE et al., 2015), contribuindo para redução da capacidade fotossintética e produtividade das culturas.

Entender esses mecanismos e a importância que o K exerce neles é fundamental para o direcionamento mais adequado da fertilização potássica em cana-de-açúcar, principalmente quando cultivada em solos arenosos dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste, deficientes em K e

susceptíveis a lixiviação, quando adubados de uma única vez, especialmente em locais de elevadas precipitações pluviométricas.

A variedade de cana-de-açúcar RB92579 é amplamente cultivada no Brasil, devido a sua elevada produtividade agrícola e boa recuperação a períodos curtos de estresse hídrico (RIDESA, 2010). Recentemente, foi lançada a variedade RB992506 (OLIVEIRA, 2015) que possui boas características produtivas e adaptabilidade ao clima e solo do Nordeste. Contudo, estudos que compare essa nova variedade com outras variedades consolidadas ainda não foram realizados e são importantes para o setor sucroalcooleiro, ampliando o conhecimento científico varietal, visando subsidiar o setor produtivo na busca por incrementos significativos de produtividade.

Assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito de concentrações crescentes de K aplicadas em solução nutritiva em duas variedades de cana-de-açúcar e em duas condições de hidratação (hidratadas e após suspensão da hidratação) sobre as características fisiológicas da cana responsáveis pela tolerância ao déficit hídrico e produtividade.

6.2. Material e métodos

6.2.1. Local do ensaio e caracterização do solo

O experimento foi implantado em casa de vegetal com coordenadas geográficas 8°04'03"S e 34°55'00"W. Foi instalado em Julho e colhido em Novembro de 2016. A casa de vegetação é apenas um ambiente protegido, porém sem controle de temperatura e umidade. Nessa época do ano, é comum as temperaturas na casa de vegetação nos períodos mais quentes do dia atingirem 50 °C e a umidade relativa do ar é em torno de 10%. Por isso, as plantas foram mantidas sob irrigação diária. Apenas na implantação, as temperaturas foram mais amenas, permanecendo assim até meados de setembro, quando se iniciou o período mais quente.

O solo para instalação do ensaio foi obtido na Estação Experimental da Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária (IPA) em Itapirema, Goiana, Pernambuco e classificado como Espodossolo (SANTOS et al., 2013).

Para caracterização química do solo, foi retirada uma amostra no local de coleta do solo na profundidade até 0,20 m e realizada as seguintes análises químicas: [pH_{água}, P, Na⁺,

K^+ , $(Ca^{2+}+Mg^{2+})$, Al^{3+} , $(H+Al)$]. Foi também determinado o teor de C orgânico total (COT) (Tabela 1) (Donagema et al., 2011). Com os resultados dessas análises foi calculada capacidade de troca de cátions potencial ($CTC_{potencial}$) e efetiva ($CTC_{efetiva}$), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m).

Tabela 1. Caracterização química do solo utilizado no ensaio

pH _{água}	P	Na ⁺	K ⁺	(Ca ²⁺ +Mg ²⁺)	Al ³⁺	(H + Al)	CTC _{efetiva} ⁽¹⁾	CTC _{potencial} ⁽²⁾	V ⁽³⁾	m ⁽⁴⁾	COT ⁽⁵⁾
(1:2,5)	mg dm ⁻³	cmolcdm ⁻³							%		g kg ⁻¹
5,13	15,81	0,02	0,05	2,30	0,0	1,50	2,37	3,87	61,00	0,00	2,32

¹Capacidade de troca de cátions efetiva; ²Capacidade de troca de cátions potencial; ³Saturação por bases; ⁴Saturação por alumínio; ⁵Carbono orgânico total.

6.2.2. Ensaio experimental

Foi avaliado o efeito de quantidades crescentes de K em solução nutritiva sobre as características bioquímicas de duas cultivares de cana-de-açúcar. Uma com boa recuperação após períodos curtos de déficit hídrico e muito cultivada no Brasil (RB92579), e outra que foi recentemente lançada no setor sucroalcooleiro (RB992506).

O experimento foi implantado em blocos ao acaso em arranjo fatorial (2x2x5) com quatro repetições, sendo cinco concentrações de K (0; 0,5; 1; 2; e 6 mmol L⁻¹), duas variedades de cana-de-açúcar (RB992506 e RB92579) e duas diferentes condições hídricas: uma em plantas mantidas hidratadas e outra em que as plantas foram submetidas à suspensão da hidratação por 48h. Utilizou-se o KCl p.a. como fonte de K.

Foram plantados colmos de cana-de-açúcar com 20 cm de comprimento e duas gemas em potes plásticos de 20 L, contendo solo. Semanalmente, foi aplicada solução nutritiva de Hoagland e Arnon original sem adaptações (Hoagland e Arnon, 1950), contendo as concentrações de K preconizadas no tratamento e mantendo-se as concentrações dos demais nutrientes. Até os 30 dias após o plantio, os vasos foram irrigados com 500 mL de água destilada a cada dois dias (fase de temperatura mais amena e plantas jovens), passando após esse período a serem irrigados com 1 L, diariamente (fase de temperatura elevada e plantas adultas).

Aos 90 dias após o plantio, as plantas foram hidratadas no final da tarde e folhas na posição +1 das plantas foram coletadas na manhã do dia seguinte. Após essa coleta, o

experimento não foi mais irrigado e as plantas foram mantidas sem hidratação por dois dias, procedeu-se uma nova coleta de folhas na mesma posição nas plantas. Foram coletados os terços médios das folhas, sem a nervura principal. As amostras foram acondicionadas em papel alumínio e submergidas em N líquido por 10 a 20 segundos e, em seguida, armazenadas em isopor com gelo, para realização posterior das variáveis bioquímicas.

6.2.3. Variáveis mensuradas

6.2.3.1. Açúcares solúveis

Foram liofilizados 20 mg de tecido foliar e macerados em cadinho com adição de N líquido para obtenção de pó fino. Após obtenção do pó, as amostras foram maceradas com 2mL de água destilada e, em seguida, adicionados mais 2 mL de água. As amostras foram agitadas por quatro vezes durante um minuto a cada 15 minutos. Em seguida, as amostras foram centrifugadas a 3.000 rpm por 15 minutos em temperatura ambiente. O sobrenadante foi coletado e armazenado em microtubos de 2mL e submetidos a nova centrifugação por 10 minutos a 6.000 rpm. O sobrenadante foi utilizado para determinação dos açúcares. Utilizou-se 50 µL do sobrenadante + 450 µL de água destilada e adicionou-se 500 µL de fenol (5%) e 2,5 mL de H₂SO₄ concentrado. A mistura foi agitada em vortex por 10-20 segundos. Os tubos foram resfriados em bandeja com gelo e as leituras foram realizadas em espectrofotômetro à 490 nm (DUBOIS et al., 1956).

6.2.3.2. Proteína

Foram macerados 100 mg de tecido foliar com N líquido para obtenção de pó fino. O pó foi macerado com 2mL de meio de reação (tampão TFK + pH 7,5 + ascorbato de sódio+EDTA+triton X), em seguida foi adicionado 0,3 g de PVPP e novamente macerado até obtenção de extrato homogêneo. O extrato foi transferido para microtubos de 2mL e centrifugados por 15 minutos a 10.000 rpm a 4 °C. O sobrenadante foi coletado e armazenado para análise de proteína. Para isso, 50 µL do extrato foram adicionados a 350 µL de água destilada e 2.000 µL de solução de Bradford e as leituras efetuadas em espectrofotômetro com comprimento de onda de 595 nm (BRADFORD, 1976).

6.2.3.3. Prolina

Foram liofilizadas 100 mg de folhas +1 e moídas até obtenção de pó fino. Em seguida foram adicionados nas amostras 8 mL de ácido sulfossalicílico (3%) mantendo-as sob agitação constante em mesa agitadora por uma hora. Após esse período, as amostras foram centrifugadas a 3.000 rpm por 10 minutos. O sobrenadante foi coletado e utilizado para determinação de prolina livre. Em um mL de extrato foram adicionados um mL de ninhidrina ácida e um mL de ácido acético glacial, sendo a mistura mantida em banho Maria a 100 °C por uma hora. Após esse período, as amostras foram acondicionadas em banho de gelo até resfriamento e foi adicionado dois mL de tolueno. Em seguida o extrato foi agitado em vortex e a fase oleosa da parte superior formada foi coletada para leitura em espectrofotômetro a 520 nm (BATES et al., 1973).

6.2.3.4. Enzimas antioxidativas

As determinações de catalase (CAT) e ascorbatoperoxidase (APX) foram realizadas com o mesmo extrato utilizado para determinação de proteína. A atividade da APX foi determinada em espectrofotômetro a 290 nm, utilizando cubeta de quartzo com leituras de 5 em 5 segundos, por 1 minuto. Para montagem da reação foram adicionados 334 µL de tampão TFK, 1566 µL de água, 20 µL de ascorbato de sódio, 20 µL de peróxido de hidrogênio (10 mM) e 60 µL do extrato (NAKANO e ASADA, 1981). Para a CAT a leitura foi em comprimento de onda de 240 nm em cubeta de quartzo com leituras de 5 em 5 segundos, por um minuto. O extrato de reação foi montado com 334 µL de tampão TFK, 1356 µL de água, 250 µL de peróxido de hidrogênio (100 mM) e 60 µL de extrato (HAVIR; MCHALE, 1987).

A atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) foi determinada em extrato obtido pela maceração de 300 mg de folha +1 com 2 mL de extrator TFK pH 7,8 em espectrofotometro a 560 nm. Após maceração, as amostras foram centrifugadas por 15 minutos a 15.000 rpm a 4 °C. Nas alíquotas de 50 µL do sobrenadante foram adicionadas 2,95 mL de meio de reação (tampão TFK pH 7,8 + EDTA 100 mM + NBT 75 µM + metionina 13 mM + riboflavina 2 µM). Após a formação da mistura, as amostras foram acondicionadas em caixa com luz fluorescente por 4 minutos (GIANNOPOLITIS; RIES, 1977).

6.2.3.5. Análise de pigmentos foliares

As folhas +1 de cada tratamento foram coletadas e analisadas para os teores de Clorofila *a*, Clorofila *b*, Clorofila *a/b* Clorofila total e carotenóides. Foram incubados 50 mg de tecido foliar por 24 horas em geladeira com 5 mL de acetona 80% e determinados em espectrofotômetro a 480 nm (carotenóides), 645 nm (clorofila *b*) e 663 nm (clorofila *a*) (HENDRY; GRIME, 1993).

6.2.3.6. Matéria seca

Toda a parte aérea das plantas contidas nos vasos foi coletada, secada em estufa de ventilação forçada até peso constante e pesadas em balança de precisão.

6.2.4. Análises estatísticas

Os dados das variáveis do experimento foram submetidos à análise de variância (ANAVA) e quando os efeitos principais e, ou, as interações foram significativas foi realizada análise de regressão ($p < 0,05$). Os coeficientes dos parâmetros da regressão foram testados, utilizando-se o teste *t* ($p < 0,05$). Foi utilizado o software SISVAR versão 5.8 (FERREIRA, 2008).

6.3. Resultados e discussão

6.3.1. Açúcares solúveis, proteínas, prolina e matéria seca

A análise de variância da regressão demonstrou efeito significativo ($p < 0,05$) das concentrações crescentes de K aplicadas nas variáveis proteína e produção de matéria seca (Tabela 2). As variedades apresentaram diferenças significativas para as características carboidrato e produção de matéria seca, porém a condição hídrica das plantas não influenciou nenhuma dessas variáveis (Tabela 2).

O aumento das concentrações de K na solução nutritiva proporcionaram aumento significativo ($p < 0,05$) no teor de proteína na folha (Figura 1A). A concentração de 6 mmol L⁻¹ de K na solução nutritiva proporcionou aumento de 13% no teor de proteína na folha, aproximadamente. O K é um nutriente reconhecido como de fundamental importância para o metabolismo de proteínas (ERNANI et al., 2007; RAO et al., 2014). Em estudo com duas

variedades de algodão, Wang et al. (2012) observaram que, para ambas as variedades cultivadas em solução com deficiência de K, o teor de proteína solúveis na folha foi inferior ao do tratamento com suficiência de K na solução nutritiva.

O teor de carboidratos foliar na variedade RB992506 foi superior ao da RB92579 (Figura 1B). A diferença entre variedades pode ser função de suas respectivas capacidades genéticas. Contudo, o teor foliar de carboidratos nas variedades foi em torno de 40 mg g⁻¹ de massa seca, semelhante ao obtido no estudo realizado por Cavalcante et al. (2015).

Tabela 2. Teor de proteína, carboidrato, prolina na folha índice e produção de matéria seca em função de concentrações crescentes de potássio em solução nutritiva em diferentes variedades de cana-de-açúcar em plantas hidratadas e não hidratadas, análise da variância e da regressão, médias e coeficiente de variação dos dados

Potássio (K) mmol L ⁻¹	Teores foliares													
	Proteína (mg g ⁻¹ MF) ⁽¹⁾				Carboidrato (mg g ⁻¹ MS) ⁽²⁾				Prolina(μmol mg ⁻¹ MS)				Matéria seca (g/vaso)	
	579 ⁽³⁾		2506 ⁽⁴⁾		579		2506		579		2506		579	2506
	Hidratada	Seca	Hidratada	Seca	Hidratada	Seca	Hidratada	Seca	Hidratada	Seca	Hidratada	Seca	Hidratada	Seca
0,0	3,27	3,26	3,31	3,06	39,47	38,48	40,83	40,37	0,59	0,82	0,67	0,79	118,44	160,52
0,5	3,59	3,38	2,99	3,32	33,2	33,74	36,53	43,03	0,47	1,12	0,43	0,49	110,76	196,35
1,0	3,64	3,25	3,35	3,64	41,73	37,95	35,82	40,98	1,46	0,95	0,67	0,55	138,44	202,85
2,0	3,67	3,7	3,59	3,66	40,17	37,86	44,67	42,5	0,69	0,8	0,75	1,03	152,94	224,95
6,0	3,52	3,39	3,68	3,99	36,83	37,35	38,31	42,88	0,45	0,84	0,49	0,93	146,36	245,66
F análise da variância														
Concentração de K	2,37ns				1,52ns				0,94ns				4474,78*	
Variedade	0,008ns				5,62*				1,78ns				52818,97*	
Condição hídrica da planta	0,002ns				0,38ns				2,56ns					
K x Variedade	1,07ns				1,16ns				1,83ns				940,10*	
K x Condição hídrica	0,13ns				0,73ns				1,54ns					
Variedade x Condição hídrica	1,66ns				2,55ns				0,009ns					
K x Variedade x C. hídrica	0,57ns				0,45ns				0,62ns					
F regressão (Concentração de K)														
Regressão Linear	5,51*				0,03ns				0,12ns				0,68*	
Regressão Quadrática	3,91ns				1,38ns				1,46ns				0,99*	
F regressão (Concentração de K x Variedade)														
Regressão Linear	RB92579	RB992506	RB92579	RB992506	RB92579	RB992506	RB92579	RB992506	RB92579	RB992506	RB92579	RB992506	RB92579	RB992506
Regressão Quadrática	0,16ns	8,49*	0,007ns	0,13ns	0,007ns	0,13ns	0,83ns	0,83ns	1,04ns	0,27ns	0,84ns	0,62ns	0,27ns	0,62ns
C.V. (%) ⁽⁵⁾	14,39				14,03				61,45				22,55	

¹Matéria seca; ²Matéria fresca; ³Variedade RB 92579; ⁴Variedade RB 992506; ⁵Coefficiente de variação = Desvio padrão/Média x 100.

*Significativo a 5% de probabilidade. nsNão significativo.

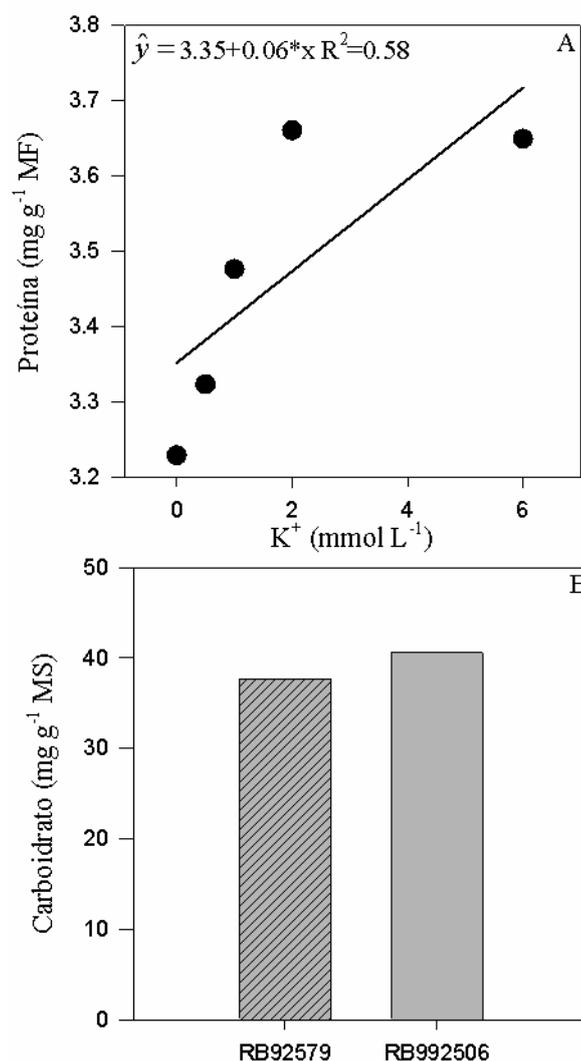


Figura 1. Teor de proteína em folha índice de plantas de cana-de-açúcar em função de quantidades crescentes de K aplicado na solução nutritiva (A) e teor de carboidrato na mesma folha de diferentes variedades de cana-de-açúcar (B)

Tanto as quantidades de K aplicadas na solução nutritiva, quanto as variedades de cana-de-açúcar proporcionaram efeitos significativos ($p < 0,05$) sobre a produção de matéria seca (Figura 2). O K aplicado proporcionou aumento quadrático sobre a produção de matéria seca da cana-de-açúcar até a dose de $4 mmol L^{-1}$ de K e a dose de $6 mmol L^{-1}$ de K na solução nutritiva proporcionou um aumento de aproximadamente 30% na produção de matéria seca em relação ao controle (Figura 2A), enquanto que, entre as variedades, a RB992506 apresentou uma produção 35% maior de matéria seca do que a variedade RB92579 (Figura 2B). Vários estudos observaram aumento da produtividade da cana-de-açúcar devido ao aumento da quantidade de K, tanto em campo, como em casa de vegetação, bem como a

ocorrência de diferentes taxas de aumento da produtividade, entre variedades, com a mesma quantidade de K aplicada (UCHÔA et al., 2009; OTTO et al., 2010; CAIONE et al., 2011; CAVALCANTE et al., 2015).

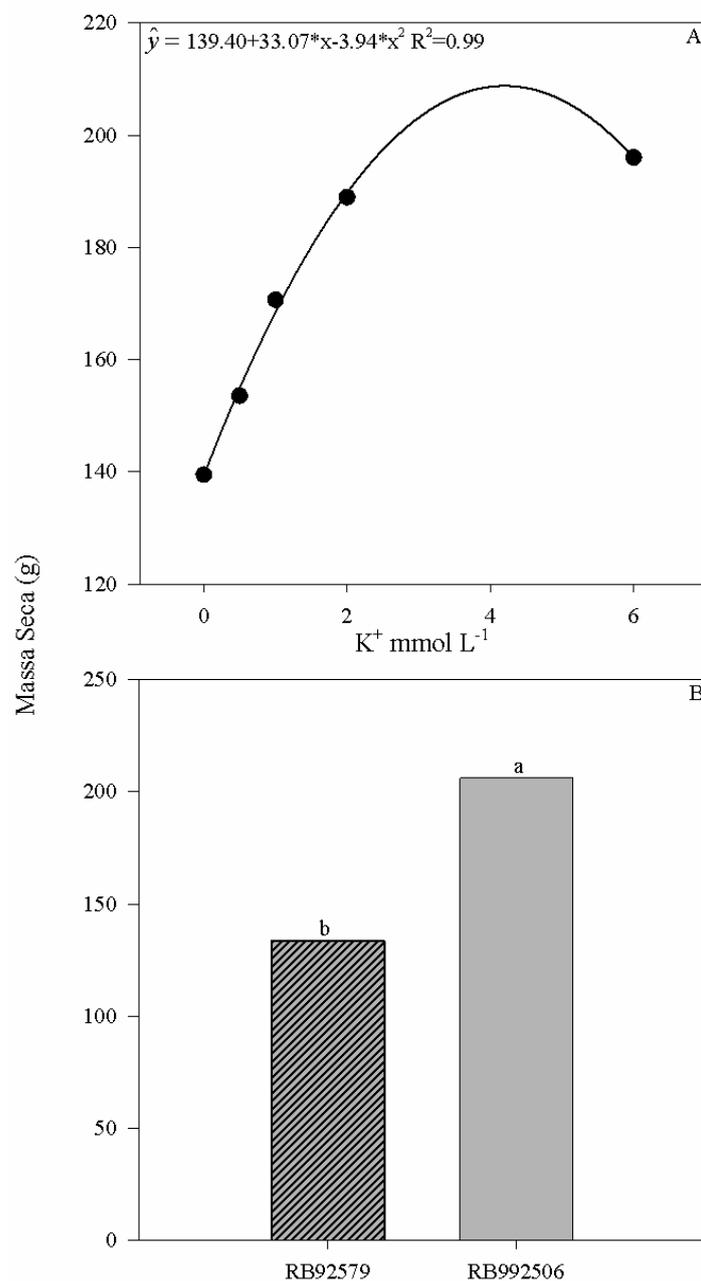


Figura 2. Produção de matéria seca de plantas de cana-de-açúcar em função de quantidades crescentes de K aplicado na solução nutritiva (A) e em diferentes variedades de cana-de-açúcar (B)

6.3.2. Pigmentos fotossintéticos

Para os pigmentos foliares apenas as variedades se diferenciaram estatisticamente ($p < 0,05$), com exceção da relação clorofila A/B, em que as quantidades de K aplicadas na solução nutritiva proporcionaram aumento linear nessa variável (Tabela 3). A condição hídrica das plantas também não influenciou o teor dos pigmentos foliares.

Tabela 3. Teor dos pigmentos foliares em função de concentrações crescentes de potássio em solução nutritiva em diferentes variedades de cana-de-açúcar em plantas hidratadas e não hidratadas, análise da variância e da regressão, médias e coeficiente de variação dos dados

(K)	Potássio mmol L ⁻¹	Teores foliares																			
		ChlA(mg g ⁻¹ MF) ⁽¹⁾				Chl B(mg g ⁻¹ MF)				Chl total(mg g ⁻¹ MF)				Chl A/B		Carotenóides(μmol mg ⁻¹ MF)					
		579 ⁽²⁾		2506 ⁽³⁾		579		2506		579		2506		579	2506	579		2506			
		Hidratada	Seca	Hidratada	Seca	Hidratada	Seca	Hidratada	Seca	Hidratada	Seca	Hidratada	Seca	Hidratada	Seca	Hidratada	Seca	Hidratada	Seca	Hidratada	Seca
	0,0	0,5	0,64	0,77	0,57	0,18	0,22	0,23	0,17	0,69	0,86	1	0,75	2,79	2,89	3,3	3,15	0,23	0,29	0,32	0,26
	0,5	0,61	0,55	0,68	0,96	0,2	0,18	0,22	0,28	0,81	0,74	0,9	1,25	2,93	2,9	3,05	3,37	0,26	0,23	0,31	0,36
	1,0	0,59	0,51	0,68	0,9	0,2	0,18	0,21	0,27	0,79	0,69	0,9	1,18	2,87	2,7	3,15	3,29	0,26	0,29	0,28	0,36
	2,0	0,67	0,64	0,66	0,98	0,21	0,21	0,2	0,3	0,89	0,85	0,86	1,28	3,12	3,02	3,26	3,23	0,28	0,3	0,28	0,42
	6,0	0,77	0,57	0,82	0,74	0,24	0,19	0,25	0,22	1,02	0,76	1,08	0,97	3,18	3,01	3,27	3,22	0,32	0,25	0,31	0,34
F análise da variância																					
Concentração de K		0,79ns				0,54ns				0,73ns				2,81*		1,16ns					
Variedade		12,89*				6,56*				11,32*				50,30*		14,80*					
Condição hídrica da planta		0,43ns				0,39ns				0,42ns				0,08ns		3,36ns					
K x Variedade		0,43ns				0,46ns				0,43ns				1,88ns		0,55ns					
K x Condição hídrica		1,22ns				1,15ns				1,20ns				1,17ns		1,77ns					
Variedade x Condição hídrica		2,71ns				2,16ns				2,59ns				2,16ns		2,26ns					
K x Variedade x C. hídrica		1,87ns				1,81ns				1,86ns				1,80ns		2,23ns					
F regressão (Concentração de K)																					
Regressão Linear		1,30ns				0,72ns				1,16ns				6,67*		1,4ns					
Regressão Quadrática		1,22ns				0,93ns				1,16ns				0,98ns		3,11ns					
F regressão (Concentração de K x Variedade)																					
		RB92579	RB992506	RB92579	RB992506	RB92579	RB992506	RB92579	RB992506	RB92579	RB992506	RB92579	RB992506	RB92579	RB992506	RB92579	RB992506	RB92579	RB992506	RB92579	RB992506
Regressão Linear		1,36ns	0,19ns	0,61ns	0,17ns	1,17ns	0,19ns	10,74*	0,14ns	1,38ns	0,24ns										
Regressão Quadrática		0,11ns	1,49ns	0,01ns	1,54ns	0,08ns	1,51ns	1,44ns	0,04ns	0,94ns	2,31ns										
C.V. (%) ⁽⁴⁾		30,5				27,84				29,73				5,86		20,62					

¹Matéria seca; ²Matéria fresca; ³Variedade RB 92579; ⁴Variedade RB 992506; ⁵Coefficiente de variação = Desvio padrão/Média x 100.

*Significativo a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo

Os pigmentos foliares são moléculas responsáveis pela fotossíntese nas plantas (TAIZ; ZEIGER, 2004). Os resultados mostraram que a variedade RB92579 apresentou valores de clorofila A, B, total, A/B e carotenóides inferiores aos da variedade RB992506 (Figura 3A, B, C, D e E). Diferenças nos teores de pigmentos foliares entre variedades de cana-de-açúcar submetidas a estresse hídrico foram observadas no trabalho de Santos et al. (2014) e maiores valores são característicos de espécies mais tolerantes ao déficit hídrico (SILVA et al., 2014). Apesar de dados na literatura indicarem que a deficiência de K ocasiona redução dos teores de clorofila devido sua degradação pelas EROs (JIN et al., 2011; AHMAD et al., 2014), as plantas deficientes em K não apresentaram diferenças significativas sobre o teor de clorofila A, B e total nesse estudo (Tabela 3), contudo, as quantidades crescentes de K aplicadas na solução nutritiva proporcionaram aumento da razão Chl A/B (Figura 3F).

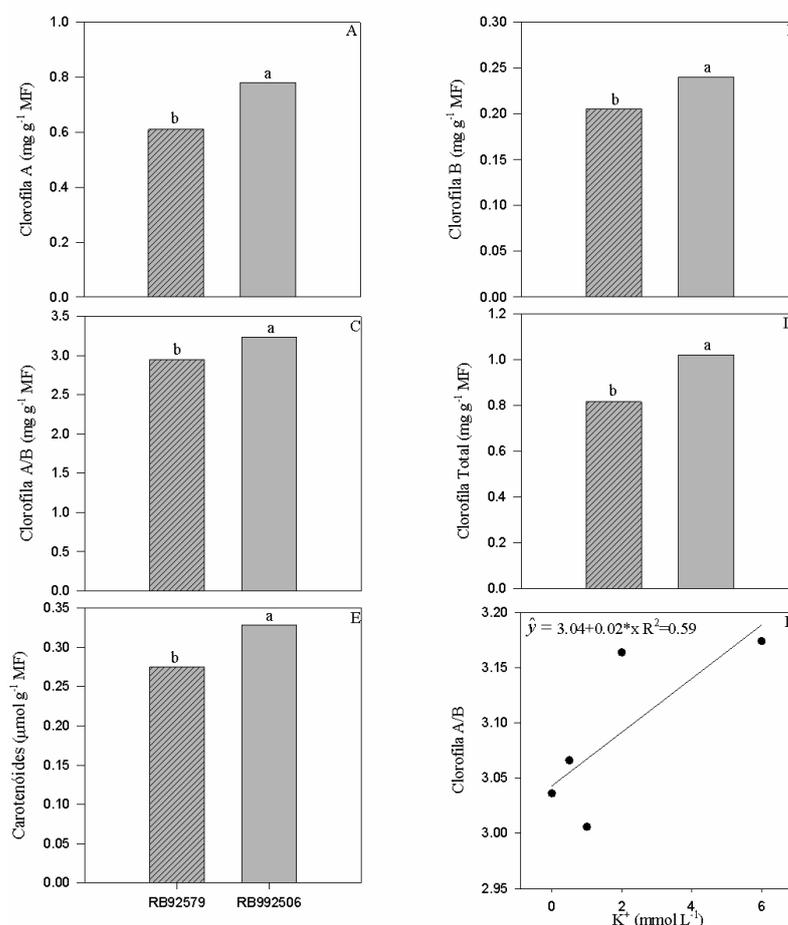


Figura 3. Teor foliar de clorofila A (A), clorofila B (B), clorofila A/B (C), clorofila total (D) e carotenóides (E) em diferentes variedades de cana-de-açúcar e teor foliar de clorofila A/B em função de quantidades crescentes de K aplicado na solução nutritiva (F).

6.3.4. Enzimas antioxidativas

As enzimas antioxidativas foram influenciadas pelas variedades, com exceção da SOD, que foi influenciada conjuntamente pelo K aplicado na solução nutritiva, porém variou esse efeito em função da variedade. A CAT e APX foi influenciada pelas quantidades crescentes de K aplicado, independente da variedade (Tabela 4). A condição hídrica não influenciou as enzimas antioxidativas.

Tabela 4. Teor de enzimas do complexo oxidativo na folha índice em função de concentrações crescentes de potássio em solução nutritiva em diferentes variedades de cana-de-açúcar em plantas hidratadas e não hidratadas, análise da variância e da regressão, médias e coeficiente de variação dos dados

Potássio (K) mmol L ⁻¹	Teores foliares											
	CAT (Unid. min ⁻¹ mg ⁻¹ prot.) ⁽¹⁾				SOD (Unid. mg ⁻¹ prot.) ⁽²⁾				APX (Unid. min ⁻¹ mg ⁻¹ prot.) ⁽³⁾			
	579 ⁽⁴⁾		2506 ⁽⁵⁾		579		2506		579		2506	
	Hidratada	Seca	Hidratada	Seca	Hidratada	Seca	Hidratada	Seca	Hidratada	Seca	Hidratada	Seca
0,0	0,14	0,14	0,11	0,12	46,58	5,75	64,31	53,13	2,06	2,23	1,48	1,92
0,5	0,15	0,15	0,13	0,13	46,85	54,93	40,64	7,87	2,11	2,13	2,15	1,74
1,0	0,11	0,19	0,15	0,13	29,98	22,96	20,52	12,45	2,01	2,33	1,38	1,37
2,0	0,11	0,13	0,09	0,12	33,23	43,96	43,74	12,97	1,68	2,05	1,55	1,4
6,0	0,13	0,13	0,09	0,1	59,59	63,64	53,43	39,21	1,45	2,33	1,11	1,63
F análise da variância												
Concentração de K	2,93*				2,94*				1,36ns			
Variedade	6,43*				0,90ns				12,55*			
Condição hídrica da planta	2,08ns				3,85ns				2,70ns			
K x Variedade	0,37ns				2,63*				0,57ns			
K x Condição hídrica	0,37ns				0,34ns				1,24ns			
Variedade x Condição hídrica	0,74ns				1,34ns				1,11ns			
K x Variedade x C. hídrica	2,16ns				1,115ns				0,28ns			
F regressão (Fator principal Dose de K)												
Regressão Linear	5,55*				4,63*				3,12ns			
Regressão Quadrática	0,20ns				4,04*				1,14ns			
F regressão (Dose x Variedade)												
	RB92579	RB992506	RB92579	RB992506	RB92579	RB992506	RB92579	RB992506	RB92579	RB992506	RB92579	RB992506
Regressão Linear	1,12ns	5,15*	5,57ns	0,46ns	1,16ns	2,02ns	0,83ns	0,07ns	0,13ns	6,11ns	0,38ns	0,80ns
Regressão Quadrática	0,83ns	0,07ns	0,13ns	6,11ns	0,38ns	0,80ns						
C.V. (%) ⁽⁶⁾	26,81				73,54				32,36			

¹Catalase; ²Ascobarto peroxidase; ³Superóxido dismutase; ⁴Variedade RB 92579; ⁵Variedade RB 992506; ⁶Coefficiente de variação = Desvio padrão/Média x 100

*Significativo a 5% de probabilidade. nsNão significativo

O aumento da concentração de K na solução nutritiva promoveu efeito significativo ($p < 0,05$) na diminuição da atividade das enzimas SOD e CAT (Figura 4A e B) e não promoveu modificação na atividade da enzima APX (Tabela 4). As enzimas SOD, CAT e

APX são denominadas enzimas do complexo antioxidativo, pois atuam na limpeza das moléculas que provocam danos oxidativos nas células (KARUPPANAPANDIAN et al., 2011; BARBOSA et al., 2014). O aumento da atividade dessas enzimas sinaliza que a planta está em situação de estresse, que pode ser hídrico ou nutricional (deficiência de K), e é indispensável para que o excesso de EROs gerado pelo estresse seja metabolizado e não prejudique a célula (SALES et al., 2013; AHMAD et al., 2014; SANTOS et al., 2014).

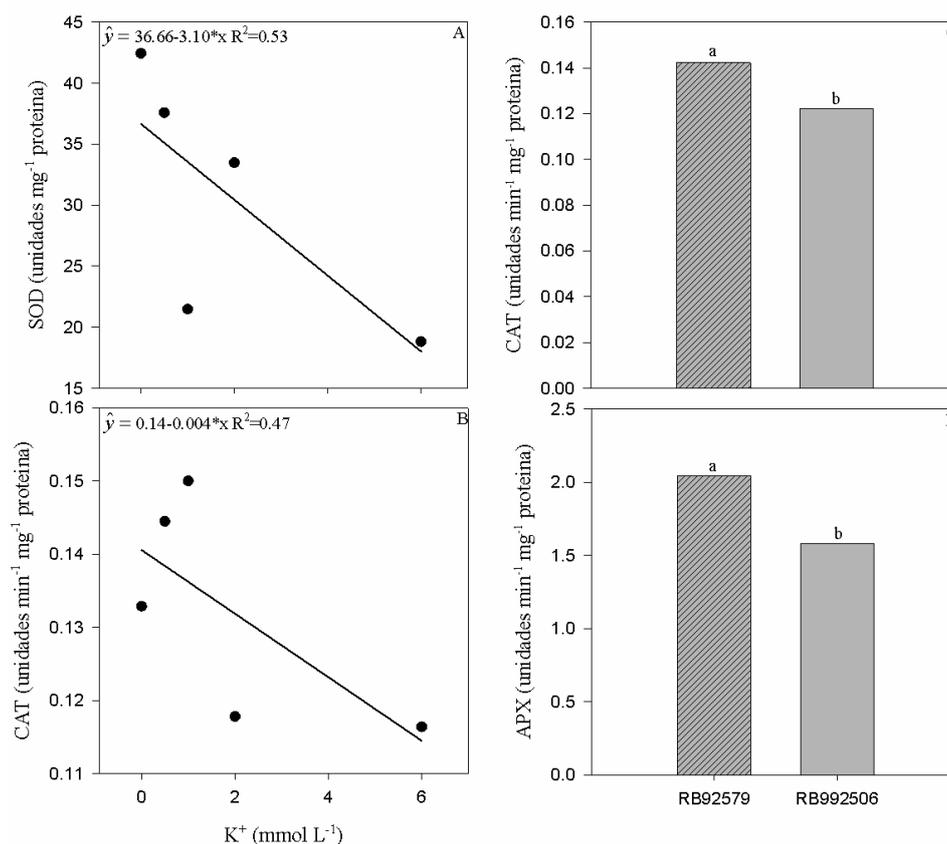


Figura 4. Atividade de superóxido dismutase (A) e catalase (B) em função de quantidades crescentes de K aplicado na solução nutritiva e teor de catalase (C) e ascorbatoperoxidase (D) em diferentes variedades de cana-de-açúcar

Como as condições impostas (hidratação e suspensão da hidratação) não proporcionaram diferenças significativas ($p > 0,05$) para as enzimas CAT, SOD e APX (Tabela 4), as causas de variação das atividades das enzimas foram em função, unicamente, da deficiência nutricional proporcionada pelas menores quantidades de K ou de características da própria variedade (Tabela 4).

O aumento da concentração de K na solução nutritiva proporcionou diminuição da atividade das enzimas SOD e CAT. A maior concentração de K na solução nutritiva

proporcionou redução de aproximadamente 56% na atividade da SOD e de 13% na atividade da CAT (Figura 4A e B).

Estudos relataram que a deficiência de K nas plantas promoveram aumento da atividade das enzimas do complexo antioxidativo (SOD, CAT e APX) devido ao aumento das EROs (WANG et al., 2012; AHMAD et al., 2014). Nesse estudo os dados mostraram que a deficiência de K teve efeito linear com o aumento da atividade das enzimas antioxidativas (Figura 4A e B). O funcionamento estomático inadequado devido à deficiência de K na planta, especialmente em situação de déficit hídrico, pode ocasionar o aumento das EROs devido a não regulação adequada dos estômatos, que continuam perdendo água por transpiração e não absorvendo CO₂ para redução na fotossíntese, sendo os elétrons gerados na fotossíntese direcionados para o O₂, o que promove a geração e o aumento das EROs (CAKMAK, 2005; WARAICH et al., 2011).

Além do funcionamento estomático inadequado, o aumento da atividade de enzimas do complexo antioxidativo consiste em um mecanismo de limpeza das EROs geradas, como sinalizadoras da deficiência de K, que possuem função de ativar a transcrição de genes que codificam proteínas de alta afinidade de absorção do K nas raízes (NIEVES-CORDONES et al., 2014).

Também foi observado que as variedades de cana-de-açúcar tiveram atividade das enzimas CAT e APX significativamente diferentes entre si ($p < 0,05$). Tanto para CAT quanto para APX, a variedade RB92579 apresentou valores de atividade enzimática superior aos valores da variedade RB992506 (Figura 4C e D). A ocorrência de diferenças entre as atividades de enzimas do complexo antioxidativo entre variedades é comum e indicam a variedade que possui maior tolerância a condições de estresse (WANG et al., 2012; SANTOS et al., 2014).

6.4. Conclusões

Observou-se que as quantidades crescentes de K aplicadas na solução nutritiva causaram diminuição da atividade das enzimas SOD e CAT e aumento do teor de proteínas na cana-de-açúcar. A atividade das enzimas CAT e APX foram maiores na variedade RB92579 do que na RB992506. Os teores de pigmentos foliares foram maiores na variedade RB992506 do que na variedade RB92579. As concentrações crescentes de K proporcionaram aumento

quadrático da matéria seca da cana-de-açúcar até a concentração de 4 mmol L⁻¹ de K, e a variedade RB992506 apresentou maior produção de matéria seca do que a RB92579. A deficiência nutricional de K ocasionou elevação da atividade das enzimas SOD e CAT, indicando que essas enzimas sinalizaram a deficiência nutricional de K, e atuaram na limpeza das EROs geradas por esta deficiência. A nova variedade (RB992506) apresentou-se promissora para o plantio e substituição da variedade RB92579 devido a maior tolerância a deficiência nutricional de K, maior capacidade de detoxificação de EROs, maior teor de pigmentos foliares e maior capacidade de produção de matéria seca em relação a RB92579.

Referências Bibliográficas

AHMAD, P.; ASHRAF, M.; HAKEEM, K. R.; AZOOZ, M.; RASOOL, S.; CHANDNA, R.; AKRAM, N. A. Potassium starvation-induced oxidative stress and antioxidant defense response in *Brassica juncea*. **Journal of Plant Interactions**, Turin, v. 9, n. 1, p. 1-9, 2014.

ANSCHÜTZ, U.; BECKER, D.; SHABALA, S. Going beyond nutrition: regulation of potassium homeostasis as a common denominator of plant adaptive responses to environment. **Journal of Plant Physiology**, Germany, v. 171, n. 9, p. 670-687, 2014.

BARBOSA, M. R.; SILVA, M. M. A.; WILLADINO, L. G.; ULISSES, C.; CAMARA, T. R. Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 3, p. 453-460, 2014.

BATES, L.; WALDREN, R.; TEARE, I. Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and Soil**, Australia, v. 39, n. 1, p. 205-207, 1973.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical biochemistry**, United States of America, v. 72, n. 1-2, p. 248-254, 1976.

CAIONE, G.; SILVA, A. F.; REIS, L. L.; DALCHIAVON, F. C.; TEIXEIRA, M. T. R.; SANTOS, P. A. Doses de potássio em cobertura na primeira soca da cana-de-açúcar cultivada no norte Matogrossense. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 4, p. 572-580, 2011.

CAKMAK, I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Germany, v. 168, n. 4, p. 521-530, 2005.

CAVALCANTE, V. S.; PRADO, R. M.; ALMEIDA, H. J.; CRUZ, F. J. R.; SANTOS, D. M. M. Gaseous exchanges, growth and foliar anatomy of sugarcane plants grown in potassium (K) deprived nutrient solution. **Australian journal of Crop Science** Lismore, v. 9, n. 7, p. 577-584, 2015.

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de métodos de análise de solo**. Riode Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 225 p.

DUBOIS, M.; GILLES, K. A.; HAMILTON, J. K.; REBERS, P.; SMITH, F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**, Illinois, v. 28, n. 3, p. 350-356, 1956.

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; SANTOS, F. C. Potássio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. D.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. Cap.IX. p. 551-594.

FERREIRA, D. F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Symposium**, Lavras, v. 6, p. 36-41, 2008.

GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide dismutases I. Occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, United Kingdom, v. 59, n. 2, p. 309-314, 1977.

HAVIR, E. A.; MCHALE, N. A. Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves. **Plant Physiology**, United Kingdom, v. 84, n. 2, p. 450-455, 1987.

HENDRY, G. A.; GRIME, J. P. **Methods in comparative plant ecology: a laboratory manual**. Springer Science & Business Media, 1993.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. **The water-culture method for growing plants without soil**. California Agricultural Experiment Station, California, v. 347, n. 2, 1950.

JIN, S. H.; HUANG, J. Q.; LI, X. Q.; ZHENG, B. S.; WU, J. S.; WANG, Z. J.; LIU, G. H.; CHEN, M. Effects of potassium supply on limitations of photosynthesis by mesophyll diffusion conductance in *Carya cathayensis*. **Tree Physiology**, United States of America, v. 31, n. 10, p. 1142-1151, 2011.

KARUPPANAPANDIAN, T.; MOON, J.-C.; KIM, C.; MANOHARAN, K.; KIM, W. Reactive oxygen species in plants: their generation, signal transduction, and scavenging mechanisms. **Australian journal of Crop Science**, Lismore, v. 5, n. 6, p. 709-725, 2011.

NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Plant and cell physiology**, Japan, v. 22, n. 5, p. 867-880, 1981.

NIEVES-CORDONES, M.; ALEMÁN, F.; MARTÍNEZ, V.; RUBIO, F. K⁺ uptake in plant roots. The systems involved, their regulation and parallels in other organisms. **Journal of Plant Physiology**, Germany, v. 171, p. 688-695, 2014.

OLIVEIRA, E. C. A. D.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I. D.; FREIRE, M. B. G. D. S.; SIMÕES NETO, D. E.; SILVA, S. A. M. D. 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.

OLIVEIRA, R. A.; DAROS, E.; HOFFMANN, H. P (org.). **Liberação nacional de variedades RB de cana-de-açúcar**. 1. ed. Curitiba: Graciosa, 2015. 72 p.

OTTO, R.; VITTI, G. C.; LUZ, P. H. C. Manejo da adubação potássica na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1137-1145, 2010.

RAO, C. S.; REDDY, S. B.; KUNDU, S. Potassium nutrition and management in Indian agriculture: Issues and Strategies. **Indian Journal of Fertilisers**, India, v. 10, n. 5, p. 58-80, 2014.

RIDESA. **Catálogo nacional de variedades "RB" de cana-de-açúcar**. Curitiba: RIDESA, 2010. p. 136.

SALES, C. R. G.; RIBEIRO, R. B.; SILVEIRA, J. A. G.; MACHADO, E. C.; MARTINS, M. O.; LAGÔA, A. M. M. A. Superoxide dismutase and ascorbate peroxidase improve the recovery of photosynthesis in sugarcane plants subjected to water deficit and low substrate temperature. **Plant Physiol and Biochemistry**, Italy, v. 73, p. 326-336, 2013.

SANTOS, C. M.; ALMEIDA SILVA, M.; LIMA, G. P. P.; BORTOLHEIRO, F. P. D. A. P.; BRUNELLI, M. C.; HOLANDA, L. A.; OLIVER, R. Physiological Changes Associated with Antioxidant Enzymes in Response to Sugarcane Tolerance to Water Deficit and Rehydration. **Sugar Tech**, India, p. 1-14, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12355-014-0325-2>>

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; OLIVEIRA, J. B.; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 316 p.

SILVA, M. A.; JIFON, J.; SILVA, J.; SANTOS, C.; SHARMA, V. Relationships between physiological traits and productivity of sugarcane in response to water deficit. **The Journal of Agricultural Science**, United Kingdom, v. 152, n. 01, p. 104-118, 2014.

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

UCHÔA, S. C. P.; ALVES JÚNIOR, H. O.; ALVES, J. M. A.; MELO, V. F.; FERREIRA, G. B. Resposta de seis variedades de cana-de-açúcar a doses de potássio em ecossistema de cerrado de Roraima. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, n. 4, p. 505-513, 2009.

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

WANG, N.; HUA, H.; EGRINYA ENEJI, A.; LI, Z.; DUAN, L.; TIAN, X. Genotypic variations in photosynthetic and physiological adjustment to potassium deficiency in cotton (*Gossypium hirsutum*). **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, Canada, v. 110, p. 1-8, 2012.

WARAICH, E. A.; AHMAD, R.; ASHRAF, M. Y. Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. **Australian journal of Crop Science**, Lismore, v. 5, n. 6, p. 764-777, 2011.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adubação potássica na cana-de-açúcar é um manejo essencial para a obtenção de alta produtividade, adequada nutrição e da homeostase de parâmetros fisiológicos. Em solos arenosos a adubação pode ser realizada na dose de 150 kg ha^{-1} de K_2O quando se almeje a produção de máxima eficiência agrônômica. A adubação potássica pode ser suprimida em solos arenosos, semelhantes ao do presente estudo, com teores de K^+ iguais ou superiores a $0,18 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, pois a probabilidade de resposta a adubação é menor que 10%. Em campo, a adubação potássica proporciona melhor homeostase de parâmetros fisiológicos da cana como a condutância estomática e transpiração e aumento dos pigmentos foliares e de prolina, além do aumento da produtividade. Já em casa de vegetação o aumento da concentração de K em solução nutritiva, além de proporcionar aumento da massa seca, proporcionou diminuição da atividade de enzimas antioxidativas, o que comprova sua ação na redução de estresses oxidativos. Contudo, esse mesmo efeito não foi observado em campo. Pesquisas futuras sobre a adubação potássica em campo devem ser realizadas a fim de se avaliar se a adubação potássica reduz, ou não, o estresse oxidativo em canaviais e quais as doses e níveis críticos de K^+ para solos com teores médios e altos de argila.