

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta tese
será disponibilizado somente a partir
de 25/02/2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**EFEITO COMBINADO DA ELEVADA [CO₂] ATMOSFÉRICA E
DÉFICIT HÍDRICO EM GENÓTIPOS DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Renan Gonçalves da Silva

Biólogo

T

E

S

E

/

S

I

L

V

A

R.

G.

2

0

2

1

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**EFEITO COMBINADO DA ELEVADA [CO₂] ATMOSFÉRICA E
DÉFICIT HÍDRICO EM GENÓTIPOS DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Discente: Renan Gonçalves da Silva

Orientadora: Profa. Dra. Sonia Marli Zingaretti

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas).

S586e Silva, Renan Gonçalves da
Efeito combinado da elevada [CO₂] atmosférica e déficit hídrico em genótipos de cana-de-açúcar / Renan Gonçalves da Silva. -- Jaboticabal, 2021
156 f.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientadora: Sonia Marli Zingaretti

1. Genética. 2. Genética vegetal. 3. Fisiologia vegetal. 4. Cana-de-açúcar. 5. Mudanças climáticas. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: EFEITO COMBINADO DA ELEVADA [CO₂] ATMOSFÉRICA E DÉFICIT HÍDRICO EM GENÓTIPOS DE CANA-DE-AÇÚCAR

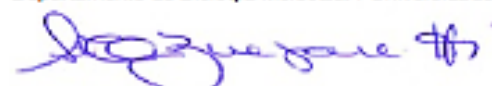
AUTOR: RENAN GONÇALVES DA SILVA

ORIENTADORA: SONIA MARLI ZINGARETTI

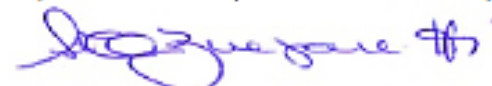
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (GENÉTICA E MELHORAMENTO DE PLANTAS), pela Comissão Examinadora:



Profa. Dra. SONIA MARLI ZINGARETTI (Participação Virtual)
Departamento de Biologia Molecular / Universidade de Ribeirão Preto - UNAERP - Ribeirão Preto



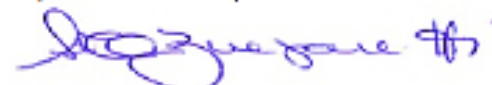
Professor Doutor TIAGO CAMPOS PEREIRA (Participação Virtual)
Departamento de Biologia / Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto - USP



Prof.^a Dr.^a JANETE APARECIDA DESIDERIO (Participação Virtual)
Vice-Diretoria / FCAV / UNESP – Jaboticabal



Profa. Dra. LILIANE SANTOS DE CAMARGOS (Participação Virtual)
Departamento de Biologia e Zootecnia / UNESP/ Câmpus de Ilha Solteira



Prof. Dr. PEDRO LUÍS DA COSTA AGUIAR ALVES (Participação Virtual)
Departamento de Biologia Aplicada à Agropecuária / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 25 de fevereiro de 2021

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

RENAN GONÇALVES DA SILVA – nascido em 09 de novembro de 1989, em Guaraçai, SP. É Licenciado em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), Câmpus de Ilha Solteira, em 2014. Foi bolsista de Iniciação científica pela FAPESP por dois anos. Foi bolsista de Graduação sanduíche pelo CNPq (2012/2013), sendo aluno da Universidade do Porto (Portugal) e estagiário no Center for Biodiversity, Functional and Integrative Genomics. Em fevereiro de 2017 concluiu o curso de Mestrado em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas) pela UNESP, Câmpus de Jaboticabal. Foi bolsista FAPESP, atuando na área de Biotecnologia e Fisiologia vegetal. Ingressou no curso de Doutorado em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas) pela UNESP, Câmpus de Jaboticabal, em março de 2017 (bolsista CAPES), atuando na área de Genômica, Fisiologia e Bioquímica vegetal. Realizou parte do seu Doutorado como bolsista (CNPq) no exterior (Portugal), no Instituto de Tecnologia Química e Biológica (Genomics Plants Stress Lab). Durante o seu percurso acadêmico: organizou eventos científicos, apresentou trabalhos em congressos, colaborou em disciplinas da pós-graduação (UNESP), publicou capítulos de livros, artigos em periódicos nacionais e internacionais.

“Um homem não pode fazer o certo numa área da vida, enquanto está ocupado em fazer o errado em outra. A vida é um todo indivisível”.

(Mahatma Gandhi)

Dedico,

Ao meu primo (irmão) Bruno (*in memoriam*) e
avó Adelina (*in memoriam*). Agradeço-vos por
tudo o que compartilhamos e evoluímos juntos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus,

À minha família e todos os familiares, especialmente, Maria das Graças, Nivaldo e Maiara. Sempre compreenderam a nossa distância física e nunca deixaram de acreditar em mim.

Ao Marcos Paulo. Eu poderia escrever dezenas de páginas, mas prefiro sumarizar esse agradecimento com a seguinte frase: “A nossa forma de amar, sonhar e realizar é extremamente válida”.

À dona Esmeralda, Karina e João, pelo laço de amor que construímos.

Aos velhos e novos amigos, Camila, Janaína, Michele, Patrícia, Maiara, Gilberto, Jéssica, Bianca, Luana, Jóice, Lucas, Rita de Cássia, Mariana, Juliana e Cristiane, por todo carinho, compreensão, ensinamentos e bons momentos compartilhados.

Agradeço à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV – UNESP) e a Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP) pelo acolhimento, estrutura e ensinamentos. Em especial, meus agradecimentos às pessoas que contribuíram grandemente para a minha formação profissional e pessoal: Profa. Dra. Sonia Marli Zingaretti, Profa. Dra. Janete Aparecida Desidério, Dra. Juliana Coppede, Profa. Dra. Priscila Lupino Gratão e Prof. Dr. Tiago Balbuena.

Também agradeço às pessoas que desde a Iniciação científica compartilharam tantos momentos de aprendizado. Em especial, aos colegas de laboratórios e técnicos.

Agradeço ao Instituto de Tecnologia Química e Biológica (Genomics Plants Stress Lab) pela experiência tão distinta e enriquecedora. Durante a pandemia (Covid 19) encontrei o apoio fundamental para o crescimento pessoal e profissional. Em especial, à Profa. Dra. Margarida Oliveira, Helena e Pedro.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001; e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de Doutorado sanduíche (Processo: 200767/2019-4).

Muito obrigado a todos que estiveram presente de alguma forma!

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais.....	1
1. Introdução.....	1
2. Objetivos.....	2
3. Revisão de literatura.....	3
3.1 Cana-de-açúcar.....	3
3.2 Mudanças climáticas e déficit hídrico.....	4
3.3 Sistema antioxidante.....	7
3.4 RNA-seq.....	8
Referências.....	10
CAPÍTULO 2 – Increased [CO ₂] causes changes in physiological and genetic responses in C ₄ crops: A brief review.....	19
1. Introduction.....	20
2. C ₄ plants of commercial importance.....	21
3. C ₄ photosynthesis mechanism and CO ₂	23
4. Physiological, biochemical, and gene expression changes.....	26
5. Perspectives.....	30
6. Conclusions.....	32
References.....	32
CAPÍTULO 3 – Statistical techniques approach: two sugarcane genotypes growth under elevated [CO ₂] atmospheric and drought.....	43
1. Introduction.....	44
2. Methodology.....	45
3. Results and discussion.....	47
4. Final considerations.....	52
References.....	53
CAPÍTULO 4 – Modulation of antioxidant systems and secondary metabolism by elevated [CO ₂] and drought in sugarcane.....	56
1. Introduction.....	57
2. Material and methods.....	59
3. Results.....	67

4. Discussion.....	76
References.....	88
Figure legends.....	102
Figures.....	107
Supplementary tables and figures.....	120

EFEITO COMBINADO DA ELEVADA [CO₂] ATMOSFÉRICA E DÉFICIT HÍDRICO EM GENÓTIPOS DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO - As projeções atuais indicam um aumento na concentração atmosférica de dióxido de carbono [CO₂] e, conseqüentemente, a intensificação da escassez dos recursos hídricos. A deficiência hídrica no solo, assim como outros fatores associados às alterações climáticas, são fatores ambientais que afetam significativamente a produtividade das culturas. Como a vegetação terrestre poderá atenuar os efeitos das mudanças climáticas? Como reagirão as plantas aos ambientes estressantes previstos para os próximos anos? Com base nos estudos que consideraram os efeitos da elevada [CO₂] e que foram realizados com plantas de metabolismo C₄, verificamos que se faz necessário investir no entendimento das respostas fisiológicas e genéticas que são reguladas frente aos múltiplos estresses (Capítulo 2). Desse modo, o objetivo dessa pesquisa foi compreender as principais respostas fisiológicas, bioquímicas e moleculares de genótipos de cana-de-açúcar, em decorrência da deficiência hídrica no solo associada ao aumento na [CO₂]. Dois genótipos de cana-de-açúcar (IACSP94-2094 e IACSP94-2101), contrastantes em relação a diversas características agrônômicas (por exemplo, recomendação de plantio e rusticidade), foram cultivados em casa de vegetação e, após 60 dias, submetidos ao bioensaio de elevada [CO₂] e déficit hídrico. O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado. Os tratamentos consistiram de plantas em condições ideais de irrigação e [CO₂] de 410 ppm (controle), e plantas submetidas à elevada [CO₂] (800 ppm) e déficit hídrico (estresse), por 30 dias. As análises compreenderam parâmetros biométricos, como o crescimento da parte aérea e do sistema radicular; parâmetros fisiológicos, como a medida da eficiência quântica do fotossistema II (F_vF_m), conteúdo de pigmentos fotossintéticos, entre outros; parâmetros bioquímicos e moleculares, relacionando a atividade de enzimas antioxidantes, conteúdo de glutatona (GSH), flavonoides, e a identificação por RNA-seq do cabedal gênico diferencialmente expresso. Em relação aos parâmetros de crescimento, as análises estatísticas mostraram o “agrupamento” das plantas avaliadas nas condições impostas (Capítulo 3). Os coeficientes de correlação entre os parâmetros biométricos foram positivamente significativos, ou

seja, o estresse hídrico foi um fator limitante para ambos os genótipos, promovendo de forma geral, uma redução significativa no desenvolvimento da parte aérea e radicular das plantas. No entanto, observa-se vias de respostas/defesa diferencialmente regulados nesses genótipos (Capítulo 4). Um total de 2.081 e 4.266 genes foram diferencialmente expressos (DEGs) nos genótipos IACSP94-2094 e IACSP94-2101, respectivamente. O genótipo IACSP94-2101, mais responsivo ao estresse abiótico, ativa um conjunto mais expressivo de genes e induz um número considerável de peroxidases. Por outro lado, no genótipo IACSP94-2094, possivelmente ocorre um acúmulo transiente de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e malondialdeído (MDA), sinalizando para a ativação do sistema antioxidante e danos menos severos nos fotossistemas (PSI e PSII). DEGs relacionados à sinalização mediada por ácido abscísico, fotossíntese e metabolismo secundário foram identificados em ambos os genótipos. Ressalta-se que o presente trabalho realizou uma abordagem global do transcriptoma. Genes potencialmente de interesse podem ser caracterizados funcionalmente e desse modo, pode-se reconsiderar os efeitos dos estresses abióticos e definir estratégias biotecnológicas que visam o melhoramento genético de cana-de-açúcar.

Palavras-chave: expressão gênica, mudanças climáticas, *Saccharum* spp., sistema antioxidante.

COMBINED EFFECT OF ELEVATED [CO₂] ATMOSPHERIC AND WATER DEFICIT ON SUGARCANE GENOTYPES

ABSTRACT - Current projections indicate an increase in the atmospheric concentration of carbon dioxide [CO₂] and consequently an intensification of the scarcity of water resources. Water deficiency in the soil, as well as other factors associated with climate change, are environmental factors that significantly affect crop productivity. How can terrestrial vegetation mitigate the effects of climate change? How will plants react to the stressful environments expected in the coming years? Based on studies that considered the effects of elevated [CO₂] and that were carried out with plants with C₄ metabolism, we found that it is necessary to invest in the understanding of the physiological and genetic responses that are regulated under multiple stresses (Chapter 2). Thus, the objective of this research was to understand the main physiological, biochemical and molecular responses of sugarcane genotypes, due to water deficiency in the soil associated with increased [CO₂]. Two sugarcane genotypes (IACSP94-2094 and IACSP94-2101), contrasting in relation to several agronomic characteristics (e.g., recommendation for planting and rusticity), were grown in a greenhouse and after 60 days, submitted to elevated [CO₂] and water deficit experiment. The experiment was carried out in a completely randomized design. The treatments consisted of plants under ideal irrigation conditions and 410 ppm [CO₂] (control), and plants subjected to elevated [CO₂] (800 ppm) and water deficit (stress), for 30 days. The analyzes included biometric parameters such as the growth of the aerial part and the root system; physiological parameters, such as the quantum efficiency of photosystem II measurement (F_vF_m), photosynthetic pigments content, among others; biochemical, and molecular parameters, relating the antioxidant enzymes activity, glutathione (GSH) content, flavonoids, and RNA-seq for differentially expressed gene identification. Regarding the growth parameters, the statistical analyzes showed the “grouping” of the plants evaluated under the imposed conditions (Chapter 3). The correlation coefficients between the biometric parameters were positively significant, that is, water stress was a limiting factor for both genotypes, promoting, in general, a significant reduction in the development of the aerial and root

parts of plants. However, we observed differently regulated response/defense pathways in these genotypes (Chapter 4). A total of 2,081 and 4,266 genes were differentially expressed (DEGs) in IACSP94-2094 and IACSP94-2101 genotypes, respectively. The IACSP94-2101 genotype, more responsive to abiotic stress, activates a more expressive set of genes and induces a considerable number of peroxidases. Otherwise, in the IACSP94-2094 genotype, there is possibly a hydrogen peroxide (H₂O₂) and malondialdehyde (MDA) transient accumulation, signaling of the antioxidant system activation and less severe damage to photosystems (PSI and PSII). DEGs related to abscisic acid-mediated signaling, photosynthesis, and secondary metabolism were identified in both genotypes. It is noteworthy that the present work carried out a global approach to the transcriptome. Potentially interesting genes can be functionally characterized and in this way, we can reconsider the abiotic stresses effects and define biotechnological strategies aimed at the genetic improvement of sugarcane.

Keywords: gene expression, climate change, *Saccharum* spp., antioxidant system.

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), considerada uma gramínea apropriada para produção de biomassa é conhecida pela capacidade de armazenamento de sacarose nos colmos e tolerante a temperaturas mais elevadas. Entretanto, o rendimento da cultura de cana-de-açúcar é consideravelmente influenciado por fatores ambientais, como a deficiência hídrica no solo e oscilações na temperatura.

Sabe-se que as modificações no regime hídrico e na temperatura média global são, em parte, consequências das mudanças climáticas devido ao aumento da emissão de gases de efeito estufa. A concentração atmosférica de dióxido de carbono ($[CO_2]$) tem aumentado expressivamente nos últimos anos e isso pode, diretamente ou indiretamente, afetar os processos biológicos em diferentes níveis de organização das plantas. No entanto, na literatura são os poucos estudos realizados com plantas de metabolismo C_4 (por exemplo, cana-de-açúcar e milho) que objetivaram investigar os efeitos da elevada $[CO_2]$ no crescimento, fisiologia e principalmente na modulação das respostas genéticas.

De modo geral, a deficiência de água no solo é um dos principais fatores limitantes do crescimento e da produção da cana-de-açúcar, por ocasionar mudanças na captação de radiação, temperatura da folha, redução das taxas de assimilação de CO_2 e transpiração, bem como, redução significativa no crescimento das plantas. Mas quais seriam os efeitos no crescimento das plantas considerando-se os cenários em que mais de um estresse ambiental (abiótico ou biótico) estão associados? Especialmente, como seria o desempenho da cana-de-açúcar em ambientes de elevada $[CO_2]$ e déficit hídrico?

As alterações relatadas, principalmente na fotossíntese, são indutoras do estresse oxidativo nas plantas. Esse estresse advém da produção de espécies reativas de oxigênio (ERO) e é potencializado por estresses, como a seca. A eliminação de ERO pode ocorrer por diferentes mecanismos antioxidantes, mediados por sistemas enzimáticos ou não.

O entendimento destes e de outros mecanismos em resposta às alterações climáticas, está intimamente relacionado com o perfil de genes expressos e, consequentemente, como os processos biológicos são regulados. Neste contexto, torna-se possível identificar vias de respostas importantes para o desenvolvimento de estratégias de melhoramento, bem como os cultivares (genótipos) de cana-de-açúcar que apresentam características de tolerância às diferentes condições ambientais limitantes.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, L.J.; MAHERALI, H.; JOHNSON, H.B.; POLLEY, H.W.; JACKSON, R.B. Gas exchange and photosynthetic acclimation over subambient to elevated CO₂ in a C₃ – C₄ grassland. **Global Change Biology**, v. 7, p. 693-707, 2001.

AGATI, G.; AZZARELLO, E.; POLLASTRI, S.; TATTINI, M. Flavonoids as antioxidants in plants: location and functional significance. **Plant Science**, v. 196, p. 67-76, 2012.

AGATI, G.; TATTINI, M. Multiple functional roles of flavonoids in photoprotection. **New Phytologist**, v. 186, p. 786–793, 2010.

AHMAD, P.; JALEEL, C.A.; SALEM, M.A.; NABI, G.; SHARMA, S. Roles of enzymatic and nonenzymatic antioxidants in plants during abiotic stress. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 30, p. 161-175, 2010.

ALSCHER, R.G. Biosynthesis and antioxidant function of glutathione in plants. **Physiologia Plantarum**, v. 77, n. 3, p. 457-464, 1989.

ALVES, L.R. Biochemical and structural alterations induced by selenium under cadmium stress in tomato plants. **Tese** (Doutorado em Agronomia – Produção vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 125p, 2019.

ANJUM, N.A.; GILL, S.S.; GILL, R.; HASANUZZAMAN, M.; DUARTE, A.C.; PEREIRA, E.; AHMAD, I.; TUTEJA, R.; TUTEJA, N. Metal/metalloid stress tolerance in plants: role of ascorbate, its redox couple and associated enzymes. **Protoplasma**, v. 251. n. 6, p. 1265–1283, 2014.

BELLOTI, M. Mecanismo de descarboxilação da fotossíntese C₄ e discriminação isotópica para seleção de genótipos do complexo *Saccharum* spp. tolerantes à seca. **Dissertação** (Mestrado em Ciências), CENA – USP, Piracicaba, 89p, 2012.

BOWYER, J.R.; LEEGOOD, R.C. Photosynthesis. In: **Plant biochemistry**. DAY, P M.; HARBONE, J. B (eds.). Academic Press, San Diego, p. 49-110, 1997.

CALSA Jr, T.; FIGUEIRA, A. Serial analysis of gene expression in sugarcane (*Saccharum spp.*) leaves revealed alternative C₄ metabolism and putative antisense transcript. **Plant Molecular Biology**, v. 63, p. 745-762, 2007.

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

CANABRAVA, A.P. **História econômica: Estudos e pesquisas**. São Paulo: UNESP. 2005. 320p.

CARVALHO, J.L.N.; AVANZI, J.C.; SILVA, M.L.N.; MELLO, C.R.; CERRI, C.E.P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 277-289, 2010.

CHAKI, M.; BEGARA-MORALES, J.C.; BARROSO, J.B. Oxidative stress in plants. **Antioxidants**, v. 9, 481, 2020.

CHAVES, M.M.; OLIVEIRA, M.M. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 407, p.2365–2384, 2004.

Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, 2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>>. Acesso em 20 nov. 2020.

CORPAS, F.J.; FERNÁNDEZ-OCAÑA, A.; CARRERAS, A.; VALDERRAMA, R.; LUQUE, F.; ESTEBAN, F.J.; RODRÍGUEZ-SERRANO, M.; CHAKI, M.; PEDRAJAS, J.R.; SANDALIO, L.M.; DEL RÍO, L.A.; BARROSO, J.B. The expression of different superoxide dismutase forms is cell-type dependent in olive (*Olea europaea* L.) leaves. **Plant Cell Physiology**, v. 47, n. 7, p. 984–994, 2006.

DEMIDCHIK, V. Mechanisms of oxidative stress in plants: From classical chemistry to cell biology. **Environmental and Experimental Botany**, v. 109, p. 212–228, 2015.

FINKELSTEIN, R.R.; GAMPALA, S.S.L.; ROCK, C.D. Absciscic acid signaling in seeds and seedlings. **Plant Cell**, v. 14, p. 15-45, 2002.

Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAOSTAT. **Crops**, 2018. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>>. Acesso em 20 nov. 2020.

GARG, N.; MANCHANDA, G. ROS generation in plants: boon or bane? **Plant Biosystems**, v. 143, n. 1, p. 81–96, 2009.

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

GHISLA, S.; MASSEY, V. Mechanisms of flavoprotein-catalyzed reactions. **European Journal of Biochemistry**, v. 181, n. 1, p. 1-17, 1989.

GILL, S. S.; ANJUM, N. A.; GILL, R.; YADAV, S.; HASANUZZAMAN, M.; FUJITA, M.; MISHRA, P.; SABAT, S. C.; TUTEJA, N. Superoxide dismutase—mentor of abiotic stress tolerance in crop plants. **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 22, n. 14, p. 10375–10394, 2015.

GILL, S.S.; ANJUM, N.A.; HASANUZZAMAN, M.; GILL, R.; TRIVEDI, D.K.; AHMAD, I.; PEREIRA, E.; TUTEJA, N. Glutathione and glutathione reductase: A boon in disguise for plant abiotic stress defense operations. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 70, p. 204-212, 2013.

GRATÃO, P.L.; MONTEIRO, C.C.; TEZOTTO, T.; CARVALHO, R.F.; ALVES, L.R.; PETERS, L.J.; AZEVEDO, R.A. Cadmium stress antioxidant responses and root-to-shoot communication in grafted tomato plants. **BioMetals**, v. 28, n. 5, p. 803-816, 2015.

GRIVET, L.; ARRUDA, P. Sugarcane genomics: depicting the complex genome of an important tropical crop. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 5, p. 122–7, 2002.

HANSON, J.; SMEEKENS, S. Sugar perception and signaling — an update. **Current Opinion Biology**, v. 12, p. 562-567, 2009.

HOANG, N.V.; FURTADO, A.; MASON, P.J.; MARQUARDT, A.; KASIRAJAN, L.; THIRUGNANASAMBANDAM, P.P.; BOTHAS, F.C.; HENRY, R.J. A survey of the complex transcriptome from the highly polyploid sugarcane genome using full-length isoform sequencing and de novo assembly from short read sequencing. **BMC Genomics**, v. 18, 395, 2017.

Intergovernmental panel on climate change - IPCC. **Climate change 2007**. Fourth Assessment Report on climate change impacts, adaptation and vulnerability of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Cambridge University, 2007. 939p.

KANAI, R.; EDWARDS, G.E. The biochemistry of C₄ photosynthesis. In: **C₄ plant biology**. SAGE, R. F.; MONSON, R. K (eds.). Academic Press, San Diego, p. 49-87, 1999.

KASIRAJAN, L.; HOANG, N.V.; FURTADO, A.; BOTHAS, F.C.; HENRY, R.J. Transcriptome analysis highlights key differentially expressed genes involved in cellulose and lignin biosynthesis of sugarcane genotypes varying in fiber content. **Scientific Reports**, v. 8, 11612, 2018.

KUMAR, S.; TRIVEDI, P.K. Glutathione S-transferases: role in combating abiotic stresses including arsenic detoxification in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, 751, 2018.

LAWLOR, D.W.; CORNIC, G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. **Plant, Cell and Environment**, v. 25, p. 275–294, 2002.

MALVIYA, M.K.; LI, C-H.; SOLANKI, M.K.; SINGH, R.K.; HTUN, R.; SINGH, P.; VERMA, K.K.; YANG, L-T.; LI, Y-R. Comparative analysis of sugarcane root transcriptome in response to the plant growth-promoting *Burkholderia anthina* MYSP113. **PloS One**, v. 15, e0231206, 2020.

MARTIN, L.B.B.; FEI, Z.; GIOVANNONI, J.J.; ROSE, J.K.C. Catalyzing plant science research with RNA-seq. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, 66, 2013.

MARTINS, M.O. Regulação da fotossíntese por deficiência hídrica, nitrogênio e CO₂ elevado em cana-de-açúcar. **Tese** (Doutorado em Bioquímica), UFC – Fortaleza, 97p, 2012.

McCORMICK, A.J.; CRAMER, M.D.; WATT, D.A. Differential expression of genes in the leaves of sugarcane in response to sugar accumulation. **Tropical Plant Biology**, v. 1, p. 142-158, 2008.

MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidant and stress tolerance. **Trends in Plant Science**, v. 7, p. 405-410, 2002.

MOORE, P.H.; MARETZKI, A. Sugarcane. In: ZAMSKI, E.; SCHAFFER, A. A (eds.). **Photoassimilate distribution in plants and crops**. Marcel Dekker, New York, USA. p. 643-669, 1996.

National Aeronautics and Space Administration – NASA. **Como será o clima da Terra em 2100?** 2015. Disponível em: <<http://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2015/06/como-sera-o-clima-da-terra-em-2100.html>>. Acesso em 21 de nov. de 2020.

National Aeronautics and Space Administration – NASA. **The effects of climate change**, 2020. Disponível em: <<https://climate.nasa.gov/effects/>>. Acesso em 17 de nov. 2020.

National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA. **Trends in atmospheric carbon dioxide**, 2020. Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/mlo.html>>. Acesso em 20 de nov. 2020.

NAWAE, W.; SHEARMAN, J.R.; TANGPHATSORNRUANG, S.; PUNPEE, P.; YOOCHA, T.; SANGSRAKRU, D.; NAKTANG, C.; SONTTHIROD, C.; WIROJSIRASAK, W.; UKOSKIT, K.; SRIROTH, K.; KLOMSA-ARD, P.; POOTAKHAM, W. Differential expression between drought-tolerant and drought-sensitive sugarcane under mild and moderate water stress as revealed by a comparative analysis of leaf transcriptome. **PeerJ**, v. 8, e9608, 2020.

PRINS, A.; MUKUBI, J.M.; PELLNY, T.K.; VERRIER, P.J.; BEYENE, G.; LOPES, M.S.; EMAMI, K.; TREUMANN, A.; LELARGE-TROUVERIE, C.; NOCTOR, G.; KUNERT, K.J.; KERCHEV, P.; FOYER, C.H. Acclimation to high CO₂ in maize is related to water status and dependent on leaf rank. **Plant, Cell and Environment**, v. 34, p. 314-331, 2010

QING, Z.M.; JING, L.G.; KAI, C.R. Photosynthesis characteristics in eleven cultivars of sugarcane and their responses to water stress during the elongation stage. **Proceedings ISSCT**, v. 24, p. 642-643, 2001.

QUE, Y.; SU, Y.; GUO, J.; WU, Q.; XU, L. A global view of transcriptome dynamics during *Sporisorium scitamineum* challenge in sugarcane by RNA-Seq. **PLoS One**, v. 9, e106476, 2014.

RODRIGUES, F.A.; DA GRACA, J.P.; DE LAIA, M.L.; NHANI, A.; GALBIATI, J.A.; FERRO, M.I.T.; FERRO, J.A.; ZINGARETTI, S.M. Sugarcane genes differentially expressed during water deficit. **Biologia Plantarum**, v. 55, p. 43–53, 2011.

ROLLAND, F.; BAENA-GONZALES, E.; SHEEN, J. Sugar sensing and signaling in plants: conserved and novel mechanisms. **Annual Review of Plant Biology**, v. 57, p. 676-709, 2006.

ROSA-SANTOS, T.M.; SILVA, R.G.; KUMAR, P.; KOTTAPALLI, P.; CRASTO, C.; KOTTAPALLI, K.R.; FRANÇA, S.C.; ZINGARETTI, S.M. Molecular mechanisms underlying sugarcane response to aluminum stress by RNA-Seq. **International Journal of Molecular Science**, v. 21, 7934, 2020.

SCANDALIOS, J.G.; ACEVEDO, A.; RUZSCA, S. Catalase gene expression in response to chronic high temperature stress in maize. **Plant Science**, v. 156, p. 103-110, 2000.

SELVARAJAN, D.; MOHAN, C.; DHANDAPANI, V.; NERKAR, G.; JAYANARAYANAN, A.N.; VADAKKANCHERRY MOHANAN, M.; MURUGAN, N.; KAUR, L.; CHENNAPPA, M.; KUMAR, R.; MEENA, M.; RAM, B.; CHINNASWAMY, A. Differential gene expression profiling through transcriptome approach of *Saccharum*

spontaneum L. under low temperature stress reveals genes potentially involved in cold acclimation. **3 Biotech**, v. 8, 195, 2018.

SILVA, R.G.; ALVES, R.C.; ZINGARETTI, S.M. Increased [CO₂] causes changes in physiological and genetic responses in C₄ crops: a brief review. **Plants**, v. 9, 1567, 2020.

SILVA, A.L.C.; COSTA, W.A.J.M. Varietal variation in growth, physiology and yield of sugarcane under two contrasting water regimes. **Tropical Agricultural Research**, v.16, p.1-12, 2004.

SILVA, M.A.; JIFON, J.; SILVA, J.A.G.; SHARMA, V. Use of physiological parameters as fast tools to screen for drought tolerance in sugarcane. **Journal of Plant Physiology**, v. 19, n. 3, p.193-201, 2007.

SILVA, M.A.; SANTOS, C.M.; ARANTES, M.T.; PINCELLI, R.P. Fenologia da cana-de-açúcar. In: **Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar**. CRUSCIOL, C. A. C.; SILVA, M. A.; ROSSETTO, R.; SORATTO, R. P (eds.). Botucatu, FEPAF, p. 8-21, 2010.

SIRICHANDRA, C.; WASILEWSKA, A.; VLAD, F.; VALON, C.; LEUNG, J. The guard cell as a single-cell model towards understanding drought tolerance and abscisic acid action. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, p. 1439–63, 2009.

SMEEKENS, S.; MA, J.; HANSON, J.; ROLLAND, F. Sugar signals and molecular networks controlling plant growth. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 13, p. 274-279, 2010.

SMIRNOFF, N. Antioxidant systems and plant response to the environment. In: **Environment and plant metabolism: Flexibility and acclimation**, v. 42, 1995.

SOLARI, L.I.; JOHNSON, S.; DEJONG, T.M. Relationship of water status to vegetative growth and leaf gas exchange of peach (*Prunus persica*) trees on different rootstocks. **Tree Physiology**, v. 26, p.1333–1341, 2006.

SOUZA, A.P. Mecanismos fotossintéticos e relação fonte-dreno em cana-de-açúcar cultivada em atmosfera enriquecida em CO₂. **Tese** (Doutorado em Ciências, na área de Fisiologia e Bioquímica de Plantas), USP, 208p, 2011.

SOUZA, A.P.; COCURON, J.C.; GARCIA, A.C.; ALONSO, A.P.; BUCKERIDGE, M.S. Changes in whole-plant metabolism during the grain-filling stage in *Sorghum* grown under elevated CO₂ and drought. **Plant Physiology**, v. 169, p. 1755-1765, 2015.

SOUZA, A.P.; GASPAR, M.; SILVA, E.A.; ULIAN, E.C.; WACLAWOVSKY, A.J.; NISHIYAMA Jr, M.Y.; SANTOS, R.V.; TEIXEIRA, M.M.; SOUZA, G.; BUCKERIDGE, M.S. Elevated CO₂ increases photosynthesis, biomass and productivity, and modifies gene expression in sugarcane. **Plant, Cell and Environment**, v. 31, p. 1116-1127, 2008.

SUGIHARTO, B. Biochemical and molecular studies on sucrose-phosphate synthase and drought inducible-protein in sugarcane (*Saccharum officinarum*). **Journal ILMU DASAR**, v. 5, n. 1, p. 62-67, 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia Vegetal. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.

TEJERA, N. A.; RODÉS, R.; ORTEGA, E, et al. Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars. **Field Crops Research**, v. 102, p.64–72, 2007.

União Nacional da Bioenergia - UDOP. **Produção brasileira de cana-de-açúcar, açúcar e etanol**, 2020. Disponível em: <<https://www.udop.com.br/producao-brasileira>>. Acesso em 20 nov. 2020.

VARA PRASAD, P.V.; VU, J.C.V.; BOOTE, K.J.; ALLEN Jr, H. Enhancement in leaf photosynthesis and regulation of rubisco in the C₄ *Sorghum* plant elevated growth carbon dioxide and temperature occur at early stages of leaf ontogeny. **Functional Plant Biology**, v. 36, p. 761-769, 2009.

VICENTINI, R.; BOTTCHEER, A.; BRITO, M.; DOS SANTOS, A.B.; CRESTE, S.; LANDELL, M.G.; CESARINO, I.; MAZZAFERA, P. Large-scale transcriptome analysis

of two sugarcane genotypes contrasting for lignin content. **PloS One**, v. 10, e0134909, 2015.

VU, J.C.V.; ALLEN, L.H.; GESCH, R.W. Up-regulation of photosynthesis and sucrose metabolism enzymes in young expanding leaves of sugarcane under elevated growth CO₂. **Plant Science**, v. 171, p. 123–131, 2006.

WINKEL-SHIRLEY, B. Biosynthesis of flavonoids and effect of stress. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 5, p. 218–223, 2002.

ZHU, J.K. Salt and drought stress signal transduction in plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 53, p.247-273, 2002.

ZUURBIER, P.; VOOREN, J.V. Sugarcane ethanol Contributions to climate change mitigation and the environment. In: **Introduction to sugarcane ethanol contributions to climate change mitigation and the environment**. Wageningen, Netherlands, cap.1, p. 19-26, 2008.