Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Avaliação do efeito do nitrogênio e do silício na produtividade da água em
biomassa e energia da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)

Asdrubal Jesus Farias Ramirez

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

Piracicaba
2018

Asdrubal Jesus Farias Ramirez
Engenheiro Agrônomo

**Avaliação do efeito do nitrogênio e do silício na produtividade da água em
biomassa e energia da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*)**
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **SERGIO NASCIMENTO DUARTE**
Co-orientador:
Prof. Dr. **RUBENS DUARTE COELHO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

Piracicaba
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Farias Ramirez, Asdrubal Jesus

Avaliação do efeito do nitrogênio e do silício na produtividade da água em biomassa e energia da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) / Asdrubal Jesus Farias Ramirez. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2018.

107 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Consumo da água 2. Qualidade tecnológica 3. Colmos 4. Silicato I. Título

DEDICATÓRIA

Aos meus queridos avos, Oliva Matheus e Jesús Ramón Ramírez (in Memoriam); pelo amor e carinho. A minha mulher María Alejandra Moreno Pizani, pelo apoio, persistência e dedicação na estrada de nossas vidas. A minhas filhas Claudia Alejandra Sarmiento Moreno e Adriana Isabel Farias Moreno, pelo amor, carinho, alegrias de minha vida. Aos meus pais, Asdrúbal José Farías Rojas e Rosario Ramírez e tias pela educação e força. Aos irmãos Andreina, Aimee e Jhoanmanuel pelas alegrias; e a todos os amigos pela ajuda incondicional.

AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as oportunidades, e por ter me dado resistencia e paciência para superar os momentos difíceis;

Ao meu orientador, Sergio Nascimento Duarte, pela amizade, apoio nos momentos difíceis, conhecimentos adquiridos, paciência e compreensão;

Ao meu co-orientador, Rubens Duarte Coelho, pela oportunidade para o desenvolvimento da pesquisa, confiança, ensinamentos, conselhos e orientações;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) e ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, pela oportunidade de realização do curso;

Aos professores do Departamento de Engenharia de Biossistemas, em especial aos professores Tarlei Botrel, Jose Antônio Frizzone, Fábio Marin, Marcos Folegatti, João Paulo Molin, Fernando Mendonça e Jarbas Honório Miranda pelos ensinamentos.;

A Prof(a). Sônia Maria De Stefano Piedade, pelo apoio e por todos os ensinamentos;

À Prof(a). Patricia A. Alves Marques e seu marido o Prof. Tadeu A. Marques pela amizade, orientações, ensinamentos e confiança;

Ao Prof. Francisco Cortéz (UCV-FAGRO) pelo apoio para inicio do doutorado;

Ao Prof. Marcelo Eduardo Alves (ESALQ-LCE), pela amizade e orientações;

Ao Prof. Felix Tápia, pela oportunidade no programa CDCH – UCV;

Ao Prof. Ezequiel Sarreta (UFSM), pelo apoio com o experimento;

Ao Prof. Antonio Pires de Camargo (UNICAMP-FEAGRI); pela amizade e ajuda para o desenvolvimento deste projeto.

Ao Prof. Francisco José Krug (CENA), pelo apoio no laboratório;

A Rosemi Fernândes e Angelo Julho Filho, pela amizade e carinho;

Aos funcionários de Departamento de Engenharia de Biossistemas (LEB) da ESALQ, em especial Beatriz Novaes, Fernanda Silva, Angela Silva, Luiz Fernando Novello, Sr. Antonio Gozzo, Gilmar Grigolon, Paula Bonassa, Davilmar Aparecida Colevatti, Luis Afonso Costa (in Memoriam);

Aos funcionários do Serviço de Pós-Graduação da ESALQ, Lucas Zanoni, Ana Maria S. Lopes, Celine de Sousa e Alexandre J. Santos;

Aos funcionários da Biblioteca da ESALQ, Ronaldo A. Caprecci, Eliana Maria Garcia e Maria Cristina M. R. Andrade;

À funcionaria Aparecida de Fátima Patreze do laboratório de Química Analítica (CENA), pela ajuda com à análise de laboratório;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado no programa PEC-PG.

À Marcos A. C. M. Amaral, Alex N. Almeida, Hugo T. Santos, Timóteo H. Barros, Ailson M. Almeida, Jéfferson O. Costa, Lucas Santos, Fernando Barbosa, Bruno A. Alves, agradeço pelo esforço e ajuda de cada um para o desenvolvimento deste projeto;

À Martiliana M. Freire mestranda do curso de Engenharia Agrícola da UFRPE, reconheço seu esforço e fico grato eternamente pela ajuda na finalização deste projeto;

Aos amigos e colegas do departamento, Cícero J. Silva, Nathalia L. Ribeiro, Luis Carvalho, Otávio N. A. Santos, Danilo Nunes, Ana Thereza F. A. Rochelle, Jefferson V. José, Charles J. Cachipundo U., Jéssica G. Nascimento, Osvaldo N. Sousa Neto, Jonathan Vasquez L., Wagner Wolff, Débora P. Souza , Arthur Sanches, Fernanda Lamede e Pedro R. F. Sampaio entre outros outros amigos de pós-graduação não citados, pelo convívio e compartilhado na pós-graduação;

Aos estudantes de ensino médio, Yane Iacope, Jessica Camila, João Machado, Jasmin Barbosa e Natália Benetello;

Aos estagiários do IF Goiano (orientados do Prof. Marconi Batista Teixeira) Giovani S. Moraes e Gustavo S. Vieira;

Aos estudantes da graduação Brenda Silva, Juliana Zucolotto, Stephanie do Carmo e Caroline Motta, pela ajuda na finalização do projeto;

Ao Colegio Salesiano Dom Bosco Cidade Alta, em especial á Professora Rosana Alves, Pe. Rafael G. Barbosa, Pe. Antônio Célio C. Francisco, e Rosebel Aparecida , pelo apoio concedido as minhas filhas;

À empresa PETROISA Brasil, pela colaboração com peças de irrigação.

Aos amigos Maria Bortolani, Margarete, Xenia Rendón e Johan Herrera;

A todos meus familiares, que sempre estão presentes apesar da distância;

Por fim, agradeço a todos que de forma direta ou indireta participaram dessa fase da minha vida, ajudando, orientando ou mesmo aconselhando.

“Se não puder voar, corra.

Se não puder correr, ande.

Se não puder andar, rasteje, mas continue em frente de qualquer jeito”.

Martin Luther King Jr.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	10
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS.....	13
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	14
LISTA DE SÍMBOLOS	16
1. INTRODUÇÃO	19
2. REVISÃO DE BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1. CARACTERÍSTICAS DA CULTURA.....	23
2.1.1. <i>Colmo</i>	23
2.1.2. <i>Folhas</i>	24
2.1.3. <i>Sistema radicular</i>	25
2.1.4. <i>A inflorescência</i>	26
2.1.5. <i>Fenologia</i>	26
2.1.6. <i>Variedades</i>	29
2.2. IMPORTÂNCIA DO SILÍCIO	30
2.3. IMPORTÂNCIA DA ADUBAÇÃO NITROGENADA	35
2.4. RELAÇÕES ENTRE SILÍCIO E NITROGÊNIO	36
2.5. PRODUTIVIDADE DA ÁGUA.....	37
2.6. PRODUTIVIDADE DA ÁGUA PARA A CANA-DE-AÇÚCAR	41
2.7. PRODUTIVIDADE DA ÁGUA PARA ENERGIA NA CANA-DE-AÇÚCAR	43
3. MATERIAL E MÉTODOS	46
3.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....	46
3.2. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS	47
3.3. SOLO.....	49
3.4. MANEJO DA ADUBAÇÃO.....	49
3.5. MANEJO DA IRRIGAÇÃO.....	50
3.6. MONITORAMENTO METEOROLÓGICO	54
3.7. PRODUÇÃO DAS MUDAS	55
3.8. CONDUÇÃO DA CULTURA.....	56
3.9. COLHEITA E VARIÁVEIS ANALISADAS NO EXPERIMENTO.....	57
3.9.1. <i>Sólidos solúveis do caldo ou Brix do caldo (B)</i>	59
3.9.2. <i>Porcentagem em massa de sacarose aparente do caldo ou Pol do caldo (S)</i>	60
3.9.3. <i>Pureza aparente do caldo (Q, %)</i>	60
3.9.4. <i>Fibra da cana-de-açúcar (F, %)</i>	60
3.9.5. <i>Teor de Açúcares Redutores do caldo (ARcaldo, %)</i>	61
3.9.6. <i>Açúcares Redutores da Cana (ARcana, %)</i>	61
3.9.7. <i>Açúcar Total Recuperável (ATR, kg Mg⁻¹)</i>	61
3.9.8. <i>Produtividade de colmos por hectare (TCH, Mg ha⁻¹)</i>	61
3.9.9. <i>Rendimento Bruto de Açúcar (RBA)</i>	62
3.9.10. <i>Umidade do colmo (Umidade, %)</i>	62
3.9.11. <i>Produtividade da água (PA)</i>	62
3.9.12. <i>Produtividade da água para açúcar (PAA, kg m⁻³)</i>	63
3.9.13. <i>Produtividade da água para biomassa (PAB, kg m⁻³)</i>	63
3.9.14. <i>Produtividade da água em energia total da parte área (PAE, MJ m⁻³)</i>	63
3.9.15. <i>Índice de clorofila Falker (ICF)</i>	64
3.9.16. <i>Índice de colheita com base na biomassa aérea (ICA)</i>	64
3.9.17. <i>Determinação da área foliar (AF)</i>	64

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
4.1. DADOS METEOROLÓGICOS	66
4.2. CONSUMO DE ÁGUA	69
4.3. VARIÁVEIS BIOMÉTRICAS DA CANA-DE-AÇÚCAR	71
4.3.1. <i>Diâmetro, altura e volume do colmo</i>	71
4.3.2. <i>Área foliar (AF)</i>	72
4.3.3. <i>Biomassa fresca da parte aérea</i>	74
4.3.3.1. <i>Massa fresca de bainhas (BNHAF)</i>	75
4.3.3.2. <i>Massa fresca das folhas (FOLF)</i>	75
4.3.3.3. <i>Massa fresca de ponteiros (PONTF)</i>	76
4.3.3.4. <i>Biomassa Fresca dos Colmos (BFC)</i>	77
4.3.3.5. <i>Biomassa fresca da parte aérea (BIOMF)</i>	78
4.3.4. <i>Biomassa seca da parte aérea (BIOM)</i>	78
4.4. VARIÁVEIS DA ANÁLISE TECNOLÓGICA DA CANA-DE-AÇÚCAR	79
4.4.1. <i>Sólidos solúveis do caldo ou °Brix do caldo (B)</i>	80
4.4.2. <i>Porcentagem em massa de sacarose aparente do caldo ou Pol do caldo (S)</i>	80
4.4.3. <i>Pureza aparente do caldo (Q, %)</i>	81
4.4.4. <i>Fibra da cana-de-açúcar (F, %)</i>	81
4.4.5. <i>Açúcares Redutores da Cana (ARcana, %)</i>	82
4.4.6. <i>Açúcar Total Recuperável (ATR, kg Mg⁻¹)</i>	83
4.4.7. <i>Rendimento Bruto de Açúcar (RBA, Mg ha⁻¹)</i>	84
4.4.8. <i>Umidade do colmo (Umidade, %)</i>	84
4.5. <i>Índices relacionados com a produção da cana-de-açúcar</i>	85
4.5.1. <i>Índice de clorofila Falker (ICF)</i>	85
4.5.2. <i>Índice de colheita com base na biomassa aérea (ICa)</i>	87
4.5.3. <i>Produtividade de colmos por hectare (TCH, Mg ha⁻¹)</i>	87
4.6. PRODUTIVIDADE DA ÁGUA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	89
4.6.1. <i>Produtividade da água para açúcar (PAA, kg m⁻³)</i>	90
4.6.2. <i>Produtividade da água para biomassa aérea (PAB, kg m⁻³)</i>	91
4.6.3. <i>Produtividade da água em energia total da parte aérea (PAE, MJ m⁻³)</i>	92
5. CONCLUSÕES.....	96
REFERÊNCIAS.....	98

RESUMO

Avaliação do efeito do nitrogênio e do silício na produtividade da água em biomassa e energia da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)

A cana-de-açúcar não só é importante para a produção de açúcar, mas também por ser uma fonte alternativa potencial para os biocombustíveis. O Brasil tem a maior área cultivada de cana-de-açúcar no mundo, porém a área de expansão esta sendo realizada em regiões marginais, representando o estigma uns dos principais problemas nestas novas áreas. O papel potencial de silício (Si) no fornecimento de tolerância contra estresses ambientais, sugere que o teor de Si em plantas pode ser uma abordagem viável para aumentar a resistência das plantas a vários fatores. Vários experimentos conduzidos no Brasil tem demonstrado o efeito do Si sob a produção da cana. Diversas pesquisas relatam a interação entre o nitrogênio (N) e o Si, embora, para a cana-de-açúcar esta relação ainda não está clara, por um lado tem-se estudos que observaram que a interação não afetou o estado nutricional da cultura; por outro lado varias pesquisas reportam que a interação promove melhorias no crescimento da cana. Assim, com a hipótese de que, deve existir uma dose de N e Si que propicia a maior produtividade da água, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o efeito do nitrogênio e do silício na produtividade da água, em biomassa e energia, para a cana-de-açúcar, analisando as variáveis relacionadas à biometria, à qualidade, e à produtividade da água. O experimento foi conduzido em uma casa de vegetação instalada na área experimental do Departamento de Engenharia de Biosistemas (LEB) da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) em Piracicaba-SP, o delineamento experimental adotado foi de 4 blocos; os tratamentos foram arranjos em esquema fatorial N x Si ($4 \times 3 + 2$), sendo quatro doses de N, 25N, 50N, 100N e 150N (15, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹ respectivamente), três doses Si, 50Si, 100Si e 150Si (175, 350 e 525 kg ha⁻¹ respectivamente). O N foi aplicado em forma de nitrato de amônio, entretanto o Si foi usado AgrosilícioPlus®. As irrigações foram realizadas por gotejamento, sendo adotado o manejo via solo através do uso de tensiômetros instalados a três profundidades no solo. Os resultados encontrados indicaram que o Si teve efeito sob a clorofila, sendo o melhor tratamento 60 kg de N ha⁻¹ 175 kg de Si ha⁻¹. Os tratamentos de N e Si não apresentaram efeitos significativos sob as variáveis da qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. Os indicadores de produtividade da água foram influenciados pelas baixas doses de N; o Si apresentou efeito em todas as dosagens, assim os maiores valores médios foram observados no tratamento 30 kg de N ha⁻¹ 350 kg de Si ha⁻¹ para a produtividade da água em açúcar, já para a produtividade da água em biomassa e energia foi o tratamento 15 kg de N ha⁻¹ 350 kg de Si ha⁻¹.

Palavras-chave: Consumo da água; Qualidade tecnológica; Colmos; Silicato; Energia.

ABSTRACT

Assessment the effect of nitrogen and silicon on water productivity in biomass and energy of sugarcane (*Saccharum spp.*)

Sugarcane is not only important for sugar production, but also because it is an alternative source of bioenergy. Brazil has the largest cultivated area of sugarcane in the world, but the expansion area is being carried out in marginal regions, representing the water deficit one of the main problems in these new areas. The potential role of silicon (Si) in providing tolerance against environmental stresses suggests that Si content in plants may be a viable approach to increasing plant resistance to various factors. Some experiments conducted in Brazil have shown the effect of Si in the production of sugarcane. In addition, several studies report the interaction between nitrogen (N) and Si, although for sugar cane this relationship is still not clear, on the one hand there are studies that observed that the interaction did not affect the nutritional status of the crop; On the other hand, several surveys report that the interaction promotes improvements in the growth of sugarcane. Thus, with the hypothesis that there must be a dose of N and Si that provides the highest productivity of water, the objective of this research was to evaluate the effect of N and Si on water productivity, biomass and energy, for sugarcane sugar analysis, analyzing the variables related to biometrics, quality, and water productivity. The experiment was conducted in a greenhouse at the "Luiz de Queiroz" College of Agriculture (ESALQ / USP) Piracicaba, SP, Brazil. Treatments were arranged in factorial scheme (4 x 3 + 2), four doses of N, 25N, 50N, 100N and 150N (15, 30, 60 and 90 kg ha⁻¹ respectively), three doses Si, 50 Si, 100 Si and 150 Si (175, 350 and 525 kg ha⁻¹ respectively). The N was applied in the form of ammonium nitrate, and for Si was used AgrosilicioPlus®. Irrigations were performed by drip irrigation, and water management was adopted through the use of tensiometers installed at three soil depths. The results indicated that the leaf area responds to Si, therefore, the highest values are in the 60 kg of N ha⁻¹ 175 kg of Si ha⁻¹ dossages. N and Si treatments did not show significant effects under the technological quality variables of sugarcane. The water productivity indicators were influenced by the low doses of N; o Si presented an effect at all dosages, so the highest mean values were observed in the treatment 30 kg of N ha⁻¹ 350 kg of Si ha⁻¹ for sugar water productivity, as well as for water productivity in biomass and energy was the treatment 15 kg of N ha⁻¹ 350 kg of Si ha⁻¹.

Keywords: Water consumption; Technological quality; straw; Silicate, Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. (a) Localização das regiões produtoras no Brasil, região Centro-Sul (com destaque para o estado de São Paulo) e região Nordeste do Brasil; (b) produção dos seis maiores produtores de cana-de-açúcar do mundo para a safra 2007/08; (c) porcentagem de cana-de-açúcar; produção de etanol e açúcar das regiões Nordeste e Sul-Central do Brasil, com o Estado de São Paulo sendo apresentado separadamente. Adaptado de Rudorff et al. (2010).	19
Figura 2. Partes da folha da cana-de-açúcar (a), numeração sequencial da folha ou ‘sistema de Kuijper’ (b) adaptado de James, (2004) e Cheavegatti-Gianotto et al. (2011).	24
Figura 3. Ilustração das fases fenológica da cana-de-açúcar. Adaptado de Moore e Botha, (2014).....	27
Figura 4. Nutrientes essenciais e benéficos para a cana-de-açúcar. Adaptado do Kingston, (2014).	31
Figura 5. Ciclo do silício na fase planta-solo. adaptado de Cooke e Leishman, (2011).	32
Figura 6. Localização da área do experimento.	46
Figura 7. Unidade experimental e sua disposição no interior da casa de vegetação.	47
Figura 8. Croqui da distribuição dos tratamentos no experimento em blocos inteiramente aleatorizados em esquema fatorial nitrogênio -silício (4x3+2).	48
Figura 9. Detalhes da aplicação de adubos e corretivos nas parcelas: Agrosilício Plus (A), dosagem e pesagem dos adubos (B), distribuição dos adubos em cada parcela (C) e aplicação (D).	50
Figura 10. Detalhes do sistema de irrigação: emissor tipo autocompensante (A), distribuição das linhas laterais na parcela (B), vista geral da distribuição dos microtubos desde o painel de controle para todas as parcelas (C e D), detalhes da montagem dos microregistros no painel de controle (E e F), vista geral do painel de controle (G), especificações técnicas da moto-bomba monobloco usada no experimento (H).	51
Figura 11. Detalhes da avaliação hidráulica do sistema de irrigação.	52
Figura 12. Detalhes dos tensiômetros instalados nas unidades experimentais: esquema de profundidades de instalação dos tensiômetros (A), vista geral dos tensiômetros na parcela (B), e detalhe do tensiômetro digital de punção usado nas leituras (C).	53
Figura 13. Estação meteorológica automática Scientific Campbell, instalada no interior da casa de vegetação... ..	55
Figura 14. Detalhes da produção de mudas: material obtido na RIDESA/UFSCar (A), plantio dos rebolos nas bandejas (B), irrigação das mudas (C), vista geral das mudas (D), controle da altura para transplântio (E) e vista geral das mudas transplantadas (F).	56
Figura 15. Detalhes da incidência de pragas: plantas com ataque de lagartas (A e B), e folhas com presença de pulgões (C e D).	56
Figura 16. Algumas adversidades ocorridas ao longo do experimento: parcelas alagadas (A, B e C), drenagem das caixas (D) e vista geral das plantas asseguradas com fitilho plástico (E e F).	57
Figura 17. Detalhes da colheita do experimento: vista geral das plantas no momento da colheita (A), corte das plantas (B), vista geral da altura dos colmos (C), colmos separados para biometria (D e E), e amostras dentro da estufa elétrica (F).	58
Figura 18. Fluxograma que resume as análises tecnológicas: em que BFC, Biomassa Fresca dos Colmos; CA, caldo da BFC; PBU, peso do bolo úmido; S, leituras sacarimétricas; B, °Brix do caldo e PBS, peso do bolo seco.	59
Figura 19. Detalhes da análise tecnológica: trituração e hominização das amostras de (A e B), vista geral da prensa hidráulica MA098 CANA - Marconi S (C), caldo extraído (CA) da amostra e bolo úmido (D, E e F), processo de clarificação e filtragem das amostras (G), sacarímetro digital Autopol I Rudolph W (H), refratômetro portátil digital de bancada Rudolph 147 E (I) e registro das leituras dos °Brix do caldo e sacarimétricas (J).	59
Figura 20. Médias mensais da Temp, temperatura do ar (°C); Rg, radiação solar global (MJ m ²); e UR, umidade relativa do ar (%) no interior da casa de vegetação durante o período de setembro 2015 até junho 2016.	66

Figura 21. Variação das temperaturas médias diárias; temperatura máxima do ar (°C); temperatura mínima do ar (°C), temperatura média do ar (°C), linha de temperatura inferior ótima do ar (°C) e linha de temperatura superior ótima do ar (°C) segundo literatura; no interior da casa de vegetação durante o período de setembro 2015 até junho 2016.....	67
Figura 22. Umidade relativa máxima, mínima e média do ar em %, no interior da casa de vegetação, durante o período de setembro 2015 até junho 2016.	68
Figura 23. Radiação global (MJ m ² dia ⁻¹); no interior da casa de vegetação, durante o período de setembro 2015 até junho 2016.	69
Figura 24. Irrigação total acumulada (litro) nos diferentes tratamentos 25N50Si a 100N-50Si (A) e 150N000Si a 100Si (B) durante o período do experimental.	70
Figura 25. 3Volume total de irrigação aplicado (litros) e valor estimado de lâmina total consumida (mm), da cana-de-açúcar RB92579, submetida em diferentes doses de nitrogênio e silício.	71
Figura 26. Valores médios da área foliar (AF, m ²) em função das doses de nitrogênio para cada nível de silício. *Significativo (P<0,05).....	74
Figura 27. Massa fresca de bainhas (g) em função das doses de nitrogênio cada nível de silício. *Significativo (P<0,05).	75
Figura 28. Massa fresca de folhas (g) em função das doses de nitrogênio cada nível de silício. *Significativo (P<0,05).	76
Figura 29. Massa fresca de ponteiros (g) em função das doses de nitrogênio cada nível de silício. *Significativo (P<0,05).	77
Figura 30. Massa fresca de colmos, BFC, (g) em função das doses de nitrogênio cada nível de silício. *Significativo (P<0,05).....	77
Figura 31. Biomassa fresca total da parte área, (g) em função das doses de nitrogênio cada nível de silício. *Significativo (P<0,05).....	78
Figura 32. Variabilidade da massa seca de colmos, BSC (g) em função das doses de nitrogênio cada nível de silício. *Significativo (P<0,05).	79
Figura 33. Índice de Clorofila Falker (ICF) em função das doses de nitrogênio cada nível de silício. *Significativo (P<0,05).....	86
Figura 34. Produtividade de colmos por hectare (TCH, Mg ha ⁻¹) em função das doses de silício cada nível de nitrogênio. *Significativo (P<0,05).	89
Figura 35. Variabilidade da Produtividade da Água para Açúcar (PAA, kg m ⁻³), para as diferentes combinações de nitrogênio e silício.....	91
Figura 36. Variabilidade da Produtividade da água para biomassa (PAB, kg m ⁻³), para as diferentes combinações de nitrogênio e silício.	92
Figura 37. Variabilidade da Produtividade da água em energia total da parte área (PAE, MJ m ⁻³), para as diferentes combinações de nitrogênio e silício.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Produtividade da água para alguns produtos agrícolas.	40
Tabela 2. Esquema da distribuição dos graus de liberdade (G.L.) para as fontes de variação, de acordo com o delineamento experimental.	48
Tabela 3. Caracterização química do solo utilizado no experimento.	49
Tabela 4. Caracterização físico-hídrica do solo utilizado no experimento.*	49
Tabela 5. Fracionamento da dose de nitrogênio (N) e potássio (K ₂ O), em %, ao longo dos meses de condução do experimento.	50
Tabela 6. Correção calcítica e magnesiana complementar para cada parcela experimental, de acordo com a tratamento de silício.	50
Tabela 7. Desempenho hidráulico do sistema de irrigação por gotejamento utilizado no experimento: vazão média do emissor (Q), variação da vazão média do emissor (q _{var}), Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD).	52
Tabela 8. Valores dos componentes da equação de van Genuchten, (1980) para o Latossolo Vermelho Amarelo, fase arenosa, série Sertãozinho, usado no experimento.	54
Tabela 9. Resumo da análise de variância com os valores calculados de F para as variáveis de Diâmetro do colmo (mm), Altura (m), Volume (cm ³) da cana-de-açúcar RB92579, submetida em diferentes doses de nitrogênio e silicato.	71
Tabela 10. Resumo da análise de variância com os valores calculados de F para a variável área foliar (AF, m ²) da cana-de-açúcar RB92579, submetida em diferentes doses de nitrogênio e silicato.	73
Tabela 11. Resumo da análise de variância para as variáveis de biomassa fresca, g.	75
Tabela 12. Resumo da análise de variância para as variáveis de biomassa seca.	78
Tabela 13. Resumo da análise de variância para as variáveis de qualidade da cana.	80
Tabela 14. Resumo da análise de variância para as para índices relacionados com a produção.	85
Tabela 15. Resumo da análise de variância para as variáveis Produtividade da Água para Açúcar (PAA, kg m ⁻³), Produtividade da Água para Biomassa (PAB, kg m ⁻³), e Produtividade da Água em Energia total da parte área (PAE, MJ m ⁻³), da cana-de-açúcar RB92579, submetida em diferentes doses de nitrogênio e silício.	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AF	Área foliar (m^2)
ARcaldo	Teor de Açúcares Redutores do caldo (%)
Arcana	Açúcares Redutores da Cana (%)
ATR	Açúcar Total Recuperável ($kg\ Mg^{-1}$)
B	Sólidos solúveis do caldo ou Brix do caldo ($^{\circ}Brix$)
BFC	Biomassa Fresca dos Colmos (g)
BIOM	Biomassa seca da parte área (g)
BIOMF	Biomassa fresca da parte aérea (g)
BNHAF	Massa fresca de bainhas (g)
CUC	Coefficiente de uniformidade de Christiansen (%)
CUE	Coefficiente de uniformidade de emissão (%)
DAP	Dias após o plantio
DAT	Dias após o transplantio
DN	Diâmetro interno (mm)
Ea	Eficiência de aplicação do sistema de irrigação (decimal)
ea	Pressão parcial de vapor (kPa)
es	Pressão de saturação de vapor (kPa)
ETm	Lâmina de irrigação obtida no tratamento 100% ETo (mm)
ETo	Evapotranspiração de referência ($mm\ dia^{-1}$)
ETr	Lâmina real de irrigação para cada tratamento (mm)
F	Fibra da cana-de-açúcar (%)
FOLF	Massa fresca das folhas (g)
G	Fluxo total diário de calor no solo ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$)
hc	Pressão equivalente à altura da coluna de água no tensiômetro (kPa)
I	Lâmina total de irrigação (mm)
ICa	Índice de colheita com base na biomassa aérea
ICF	Índice de clorofila Falker
Ky	Coefficiente de resposta da cultura
Lb	Lâmina total aplicada de irrigação (mm)
Lt	leitura no tensiômetro(kPa)
m	Saturação por alumínio da CTC efetiva (%)
PA	Produtividade da água ($kg\ m^{-3}$)
PAA	Produtividade da água para açúcar ($kg\ m^{-3}$)
PAB	Produtividade da água para biomassa ($kg\ m^{-3}$)
PAE	Produtividade da água em energia total da parte área ($MJ\ m^{-3}$)
PONTF	Massa fresca de ponteiros (g)
PVC	Policloreto de vinila
Q	Pureza aparente do caldo (%)

qe	Vazão do gotejador (L h ⁻¹)
Qreal	Descarga real do emissor (L h ⁻¹)
qvar	Variação de descarga do emissor (%)
RBA	Rendimento Bruto de Açúcar (Mg ha ⁻¹)
Rn	Radiação líquida total diária (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
s	Taxa de variação da pressão de vapor em relação à temp. (kPa°C ⁻¹)
S	Porcentagem em massa de sacarose aparente do caldo ou Pol do caldo (%)
SB	Soma de bases (cmolc dm ⁻³)
t	CTC efetiva (cmolc dm ⁻³)
T	CTC a pH 7,0 (cmolc dm ⁻³)
TCH	Produtividade de colmos por hectare (Mg ha ⁻¹)
TCH	Produtividade de colmos por hectare (Mg ha ⁻¹)
Td	Temperatura média diária (°C)
Ti	Tempo de irrigação (h)
UD	Uniformidade de distribuição (%)
V	Saturação por bases (%)
γ	Constante psicrométrica (0,063 kPa°C ⁻¹)
Ψm	Potencial matricial de água no solo, kPa;
θ	Umidade volumétrica atual, (cm ³ cm ⁻³)

LISTA DE SÍMBOLOS

B	°Brix
cm	centímetros
g	gramas
kg	quilogramas
kPa	quilopascal
m	metros
MPa	megapascal
°C	graus centígrados

1. INTRODUÇÃO

As indústrias de cana-de-açúcar em todo o mundo têm uma contribuição valiosa para o desenvolvimento sustentável; assim, nos países tropicais, a cultura não só é importante por sua produção de açúcar, mas também por ser uma fonte alternativa potencial para os biocombustíveis, devido a sua capacidade de produção de álcool e de matéria seca. Assim, como a cana-de-açúcar é cultivada objetivando o lucro através de seu conteúdo de sacarose, inversamente, no caso da cana-de-energia, o alvo é seu alto teor de fibra (Everingham *et al.*, 2015; Matsuoka *et al.*, 2015; Silva, Soares, *et al.*, 2008).

O Brasil tem a maior área cultivada de cana-de-açúcar no mundo, sendo responsável por aproximadamente 657 milhões de Mg de cana, representando quase 41% da produção mundial de cana-de-açúcar (CONAB, 2018; FAOSTAT, 2018). Assim, de acordo com dados CONAB (2018), observou-se um aumento da área plantada no Brasil, passando de aproximadamente 8.655 mil hectares (2016/15) a 9.049 mil hectares (2016/17), representado um acréscimo na área de cerca de 394,4 mil hectares na safra 2016/17, equivalendo a 4,6% em relação à safra 2016/15. Para janeiro 2018, conforme dados do IBGE (2018), a produção, deve alcançar um valor estimado de 671.124.842 Mg, onde se destaca o Estado de São Paulo, que participa com aproximadamente 52,4% da produção, alcançando um valor estimado de 351.499.969 Mg (Figura 1).

Figura 1. (a) Localização das regiões produtoras no Brasil, região Centro-Sul (com destaque para o estado de São Paulo) e região Nordeste do Brasil; (b) produção dos seis maiores produtores de cana-de-açúcar do mundo para a safra 2007/08; (c) porcentagem de cana-de-açúcar; produção de etanol e açúcar das regiões Nordeste e Sul-Central do Brasil, com o Estado de São Paulo sendo apresentado separadamente. Adaptado de Rudorff *et al.* (2010).

A produtividade da cana em regiões tropicais e subtropicais do Brasil, em condições de sequeiro, pode chegar a mais de 100 Mg ha⁻¹; no entanto, na maior parte das regiões produtoras, o rendimento é bastante inferior a este valor. Isto pode ser devido ao fato de que a maioria das expansões de área de plantio da cana-de-açúcar no Brasil estão sendo realizadas em áreas marginais. Um dos mais graves problemas encontrados nestas novas áreas é a ocorrência de períodos de estiagem. Sob estas condições, os produtores passam a depender da irrigação para atingir

as metas de produção. Porém, um cultivo irrigado em condições climáticas favoráveis, com fertilidade do solo e condução adequada de manejo, pode alcançar uma produção superior a 200 Mg ha⁻¹ (Oliveira, Ramos e Aquino, 2015; Silva, Soares, *et al.*, 2008).

Em termos de produtividade de açúcar, Begum *et al.* (2012) sugerem que a formação de sacarose está diretamente relacionada com a fotossíntese. Os genótipos que produzem mais clorofila sob condição de estresse podem realizar mais fotossíntese, resultando em maior formação de sacarose. Além a taxa de alongamento relativa do colmo e da folha da cana-de-açúcar, são extremamente sensíveis ao estado de água na cultura (Inman-Bamber, N. G. G. e Smith, 2005).

Em escala global, o nitrogênio (N) é importante por ser um elemento-chave para a produtividade de todos os ecossistemas. O N é constituinte de vários compostos em plantas, destacando-se os aminoácidos, ácidos nucléicos e clorofila. Algumas áreas do mundo, tais como partes de África, Ásia e América Latina, não têm N suficiente para sustentar adequadamente suas populações. No Brasil, a principal fonte de nitrogênio reativo, proveem da fixação biológica de N₂, sendo o aporte N fixado na produção de soja, superior à quantidade de N adicionada como fertilizante; porém, em pastagens, cana-de-açúcar e em outros ecossistemas de gramíneas, estes aportes são relativamente precários (Novais *et al.*, 2007).

Por outro lado, segundo Cabral *et al.* (2012) a evapotranspiração aumenta com o crescimento da energia disponível no ambiente, quando a cobertura é totalmente desenvolvida, e a máxima evapotranspiração da cultura aproximou-se da evapotranspiração de referência. Assim, uma compreensão de como a cana responde à seca é fundamental para melhorar a gestão das culturas e a eficiência do uso da água, permitindo a viabilidade do cultivo da cana (Azevedo *et al.*, 2011).

O silício (Si), que é o oitavo elemento mais comum na natureza, representa 27,7% da crosta terrestre é o segundo elemento mais comum encontrado no solo depois de oxigênio, aparece geralmente na forma de dióxido de silício (SiO₂) (também conhecido como sílica) e silicatos, que são compostos contendo silício, oxigênio e metais. Na solução do solo, o Si encontra-se na forma de ácido monossilícico (H₂SiO₄), em cuja forma é absorvido pelas plantas. Entre suas funções está melhorar o crescimento das plantas e a produtividade, especialmente em condição de estresse, sendo considerado por estes fatos como um elemento benéfico (Filgueiras, 2007; Novais *et al.*, 2007; Sahebi *et al.*, 2015).

O papel potencial de Si no fornecimento de tolerância contra estresses abióticos, juntamente com estresses bióticos, sugere que o teor de Silício em plantas pode ser uma abordagem viável para aumentar a resistência das plantas a vários fatores / estresses ambientais. Isto ocorre com a deposição de silício nos tecidos submetidos a estresse hídrico, diminuindo a transpiração, regulando os processos fisiológicos e bioquímicos. Para aumentar a tolerância da planta, o Si promove a fotossíntese da planta pela favorável exposição das folhas à luz (Majeed Zargar *et al.*, 2010; Sahebi *et al.*, 2015; Zhu e Gong, 2014).

O Silício está presente nas plantas, em quantidades equivalentes às de tais elementos de macronutrientes como cálcio, magnésio e fósforo, e em gramas muitas vezes em níveis mais elevados do que qualquer outro componente inorgânico. O teor de Si das plantas varia amplamente com o tipo de genótipo diferente, em consequência o efeito do Si varia com as espécies de plantas; e, geralmente, é mais acentuada nas plantas que acumulam grande quantidade de Si (Epstein, 1999; Ma e Takahashi, 2002). Assim, em plantas relativamente primitivas como as briófitas e como algumas das plantas mais evolutivamente avançadas, tais como os Poales são plantas de elevado acúmulo de Si (Epstein, 1999). Dentro deste último grupo encontra-se a família Poaceae, onde está a cana-de-açúcar, Segundo Korndörfer; Pereira; Camargo (2002a) o Silício aparece em altas concentrações nas

folhas da cana-de-açúcar, podendo variar de 0,14% em folhas jovens até 6,7% em folhas velhas. A cana-de-açúcar responde favoravelmente a adubação com Si, particularmente nos solos pobres nesse elemento. Experimentos de campo conduzidos no Brasil, tem demonstrado resultados bastante consistentes com relação ao efeito do Si em cana-de-açúcar.

A absorção de N pode afetar a absorção de outros nutrientes também por efeito da alteração do pH na região da rizosfera; quando o N é absorvido na forma de NO_3^- , ocorre alcalinização da rizosfera, ao passo que a absorção de NH_4^+ provoca o aumento da acidez. As exigências das plantas por N no Brasil são elevadas, e dependem do nível de produtividade; assim, para uma faixa de produtividade 80-200 Mg ha^{-1} , variam de 112 a 280 kg ha^{-1} . Estas altas demandas podem levar a mudanças de pH, o que pode resultar no aumento ou na redução da solubilidade ou disponibilidade de alguns nutrientes (Novais *et al.*, 2007).

Vários estudos com arroz relatam a interação N e Si; com o aumento das doses de N diminui o teor de Si na parte aérea (Baliza *et al.*, 2007; Fallah, 2012; Mauad, Crusciol, *et al.*, 2003; Vidal, 2008). No caso da cana-de-açúcar, embora todas as pesquisas relatem que o uso da adubação nitrogenada, associada ao Si, não afetaram a qualidade tecnológica (Bastos, 2008a; Borges, 2012; Fonseca, 2011; Silva, 2014), os estudos são controversos quanto ao efeito na planta. Por um lado, afirmam que as doses de N e Si não afetaram o estado nutricional da cultura, porém influenciaram o acúmulo de N e Si na planta (Borges, 2012). Por outro lado, reportam que a interação entre doses de N e uso de Si promove melhorias no estado nutricional e aumenta o acúmulo de N e de Si na cana-de-açúcar, promovendo melhorias nas variáveis de crescimento da cana-de-açúcar (Bastos, 2008a; Fonseca, 2011; Oliveira, R. C. De *et al.*, 2014).

Diante do exposto, é evidente a existência de uma possível relação entre o silício, o nitrogênio e a demanda de água pela cultura; nessa linha foram estabelecidas para esta pesquisa a seguinte hipótese e objetivos:

1.1 Hipótese

Existe uma dose ótima de nitrogênio e de silício que propicia a maior produtividade da água, em biomassa e em energia.

1.2 Objetivo Geral

Avaliar o efeito do nitrogênio e do silício na produtividade da água, em biomassa e energia, para a cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*).

1.2.1 Objetivo Específicos

Determinar a produtividade em biomassa de cana-de-açúcar, plantada com diferentes doses de nitrogênio e silício;

Avaliar o efeito do nitrogênio e do silício na produtividade da água em biomassa (PABF), para a cana-de-açúcar; e

Estimar o efeito do nitrogênio e do silício na produtividade da água em energia total (PAET), para a cana-de-açúcar.

2. REVISÃO DE BIBLIOGRÁFICA

2.1. Características da cultura

A cana é uma planta de metabolismo do tipo C4 e como tal tem um mecanismo de concentração CO₂ que prevê, entre outras vantagens, uma redução na fotorrespiração e maior eficiência no uso da água (Azevedo *et al.*, 2011). É uma planta perene própria de climas tropicais e subtropicais, adaptada a ambientes com alta intensidade luminosa e térmica, seu centro de origem encontra-se em uma vasta região entre Índia e China no Sudeste Asiático, estando seu centro de diversidade na Papua-Nova Guiné, onde presume-se foi a região de domesticação da *Saccharum officinarum* L.

Pertence à família Poaceae e ao gênero *Saccharum*, que abrange várias espécies pertencentes ao gênero *Saccharum*: *S. officinarum* L., *S. spontaneum* L., *S. robustum* J., *S. sinnensis* R. e *S. barberi* J.; no entanto, as canas atualmente cultivadas, na sua maioria, são híbridas, portanto, a terminologia taxonômica atual dos cultivares de cana é *Saccharum spp.*, já que não se cultiva comercialmente canas que não sejam fruto do melhoramento (Dinardo-Miranda, Vasconcellos e Landell, 2008; Hunsigi, 1993; James, 2004; Moore e Botha, 2014). O ambiente ideal para a cana-de-açúcar é aquele com duas estações distintas, uma quente e úmida, onde a chuva (ou irrigação) é bem distribuída durante a estação de crescimento para proporcionar a germinação, perfilhamento e desenvolvimento vegetativo, seguido de outra fria e seca, onde o período de pré-colheita é relativamente seco e as horas de sol são abundantes durante toda a temporada, para promover a maturação e conseqüente acúmulo de sacarose nos colmos (Caputo *et al.*, 2008; James, 2004). Assim a cana-de-açúcar é cultivada desde o nível do mar até 1.500 m e entre as latitudes compreendida entre os paralelos 35° de latitude Norte e Sul (Caputo *et al.*, 2008). Entretanto Glasziou *et al.*, (1965), afirmaram que os valores maiores de concentração de sacarose no caldo de cana são obtidas aos 18° latitudes norte e sul do equador. Desta forma, para as condições geográficas do Brasil, possibilitam a concentração da produção em duas regiões (Figura 1). Uma região ubicada na parte do subtropico entre as latitudes 14° a 33° Sul, onde ocorre quase o 90% da produção, e outra na região tropical entre as latitudes 2° a 14° Sul denominada região Nordeste com o restante da produção. As variações climáticas entre estas regiões permitem ter duas colheitas anuais, de setembro a abril, no Norte-Nordeste e de maio a dezembro, na região Centro-Sul (Costa *et al.*, 2011).

A morfologia da planta é composta por colmos, folhas, raízes e flores. Cada um tem um papel importante no crescimento, no amadurecimento e na produção da cultura. A propagação vegetativa da cana-de-açúcar é, normalmente, feita por toletes contendo uma ou mais gemas. A gema nada mais é do que um colmo em miniatura contendo nós, entrenós e primórdios de raiz e de gema que se desenvolvem para produzir outros colmos que, nas fases iniciais de desenvolvimento, são chamados perfilhos. O perfilhamento acontece após a brotação das gemas, quando formar outros rebentos, aos quais se denominam perfilhos. Por último, há o processo de formação da inflorescência, quando a cana deixa de produzir folhas e colmos, passando a formar a inflorescência (Dinardo-Miranda, Vasconcellos e Landell, 2008; Hunsigi, 1993; James, 2004; Moore e Botha, 2014).

2.1.1. Colmo

Botanicamente, a haste de uma gramínea é referido como o colmo, na cana-de-açúcar são uma haste sólida, não ramificada, aproximadamente circular em seção transversal, é claramente diferenciada em juntas, cada uma composta por nós e entrenós ou internós e podem ser definidos como a porção acima do solo, que sustenta as

folhas e a inflorescência (Dinardo-Miranda, Vasconcellos e Landell, 2008; Hunsigi, 1993; James, 2004; Moore e Botha, 2014).

O nó não é apenas o local de ligação da folha, mas também um elo importante para o tecido vascular do colmo, assim o nó é constituído por uma região onde se insere a bainha da folha; uma banda contendo os primórdios radiculares que inclui uma gema lateral; um anel de crescimento, região onde concentra-se as células que permitem o alongamento do entrenó; uma zona cerosa e finalmente o entrenó (Dinardo-Miranda, Vasconcellos e Landell, 2008; Hunsigi, 1993; James, 2004; Moore e Botha, 2014).

Cada gema compreende o meristema lateral coberto por escamas de botões semelhantes a folhas que protegem o meristema da dessecação, dano físico e ataque de patógenos. Podem estar situadas sobre, ou logo acima, a cicatriz da folha, na base de cada entrenó, disposta, como as folhas, em lados alternados em entrenós sucessivos. As gemas apresentam diversos formatos sendo redondas, triangular, pentagonal, rombóide, redonda, oval, obovada, oval alongada, retangular e imbricada, podendo ser pequenas e comprimidas no caule, ou mais proeminentes e pontiagudas, dependendo da variedade (Dinardo-Miranda, Vasconcellos e Landell, 2008; Hunsigi, 1993; James, 2004; Moore e Botha, 2014).

Os internódios são os órgãos de armazenamento de açúcar da planta e variam em comprimento de menos de 1 cm a mais de 30 cm, estando muito mais próximos no topo, onde o alongamento está ocorrendo e na base, onde os novos perfilhos estão sendo produzidos, o comprimento e o diâmetro dos entrenós também são afetados por outros fatores, como a idade e variedade da planta, assim como, as condições durante o crescimento, das quais a umidade, a nutrição e a temperatura são os mais importantes. A cana-de-açúcar normalmente atingem cerca de 2-3 m de altura na estação normal de crescimento (Bull, 2000; James, 2004).

2.1.2. Folhas

As folhas são os "motores" fotossintéticos da planta, produzindo o açúcar que é armazenado nos colmos. As folhas são alternadas, opostas e presas aos nós dos colmos, e podem ser basicamente dividida em três partes (Figura 2) a lâmina (compreendendo a folha propriamente dita com uma nervura central de forma engrossada), a bainha (que envolve o colmo em desenvolvimento imaturo e as folhas mais jovens) e a articulação junta entre elas, chamada de colar (Bull, 2000; Dinardo-Miranda, Vasconcellos e Landell, 2008; Moore e Botha, 2014).

Figura 2. Partes da folha da cana-de-açúcar (a), numeração sequencial da folha ou 'sistema de Kuijper' (b) adaptado de James, (2004) e Cheavegatti-Gianotto *et al.* (2011).

A lâmina é uma estrutura alongada e relativamente plana, de comprimento variável na fase adulta entre 0,5 a 1,5 m, com largura de 2,5 a 10 cm, sempre dependendo da variedade. É sustentada por uma nervadura central que se estende por todo seu comprimento. Costuma ter bordos serrilhados (corpos silicosos) e algumas variedades apresentam pelos finos chamados de joçal, no dorso das bainhas, dificultando o manuseio. A partir da nervadura central, saem em ângulo nervaduras paralelas contendo um feixe vascular cada uma. Entre elas são encontradas fileiras de estômatos nas duas faces da folha, mas em maior quantidade no limbo inferior (Dinardo-Miranda, Vasconcellos e Landell, 2008).

A bainha é uma estrutura fina de forma tubular que se sobrepõe ao colmo na base, e mais larga na base do que no topo, mas tende a ser pressionada menos de perto contra o colmo em direção à lâmina da folha, ela circunda firmemente o colmo e é separado da lâmina foliar pontiaguda e afilada por um ligamento e por uma ou duas barbelas dependendo da variedade (James, 2004).

O tamanho e o número de folhas aumentam a partir da germinação e há cerca de 10 por colmo na maturidade, o comprimento depende da variedade e das condições de crescimento, mas é geralmente entre 0,9 m e 2,0 m nas folhas maduras, a largura está fortemente correlacionada com o diâmetro do colmo e varia de cerca de 2,0 cm a 6,0 cm em variedades comerciais (Bull, 2000).

Folhas, nós e entrenós são numerados sequencialmente, de modo que os entrenós mais antigos em direção à base da planta tenham números mais altos (Figura 2), enquanto as folhas mais jovens diminuem em número para 0, -1, -2 e assim por diante, este sistema é denominado ‘sistema de Kuijper’, onde a folha de inserção mais alta, que se encontra completamente aberta e apresenta a primeira aurícula visível recebe a denominação de folha +1, conhecida como TVD (Top Visible Dewlap). Abaixo dela, as folhas recebem, sucessivamente, os números +2, +3 e +4 (Marafon, 2012; Moore e Botha, 2014).

2.1.3. Sistema radicular

As raízes são os órgãos responsáveis por absorver a água e os nutrientes do solo necessário para o crescimento das plantas, elas também fornecem sustentação para a planta. Possuem formato cilíndrico e se afinam em direção ao ponto de crescimento com regiões bem definidas, sendo a capa protetora da raiz, o ponto de crescimento e região de alongação e a região dos pelos radiculares. A capa protetora está localizada na ponta extrema da raiz e sua função principal é proteger o ponto de crescimento onde as células estão em plena divisão. Dessa forma, essas células podem formar a capa protetora ou região de alongação. Os pelos radiculares derivam de células de epiderme e sua função principal é absorver água e nutrientes colar (Bull, 2000; Dinardo-Miranda, Vasconcellos e Landell, 2008).

Diversos tipos de raízes morfológicamente distintas são produzidos pela planta de cana-de-açúcar. Após a germinação de uma semente verdadeira de cana-de-açúcar, o embrião dá origem ao coleorhiza que envolve a radícula, que se torna a raiz primária (seminal). Entretanto, quando as plantas são reproduzidas pelo surgimento de uma gema de uma seção do colmo maduro, um padrão ligeiramente diferente de crescimento radicular é visto. Na base de cada entrenó, uma faixa de primórdios de raízes circunda o colmo adjacente ao gema lateral. Após alguns dias de plantio ou exposição a um ambiente úmido, os primórdios das raízes se desenvolvem e se alongam. As raízes brotadas das gemas são posteriormente substituídas por raízes mais robustas, que emergem da base do rebolo em desenvolvimento colar (Bull, 2000; Moore e Botha, 2014).

A arquitetura do sistema radicular muda de acordo com estresse bióticos, abióticos, a idade da planta, tanto entre ciclos (cortes) como dentro de um mesmo ciclo. O sistema radicular da cana planta explora mais intensamente as camadas mais superficiais, se comparado com a soqueira, que apresenta um incremento na exploração de subsuperfície. Algumas raízes de cana-de-açúcar podem se estender até mais de 2 m de profundidade em um perfil de solo favorável e ajudar a ancorar a planta, mas geralmente as raízes mais ativas são encontradas a menos de 0,5 m da superfície do solo colar (Bull, 2000; Dinardo-Miranda, Vasconcellos e Landell, 2008).

2.1.4. A inflorescência

Embora a cana-de-açúcar seja propagada assexuadamente para fins comerciais, muitas variedades florescem e produzem sementes. Sendo indesejável para o manejo, devido ao consumo de energia com perdas no teor de sacarose e alterações na qualidade da matéria-prima industrial. Entre as desvantagens do florescimento estão: qualidade reduzida, cana lignificada, perda de dominância apical, desenvolvimento de brotações laterais, lâminas foliares mais curtas com menor rendimento, alta fibra e menor extração de caldo (Bull, 2000; Dinardo-Miranda, Vasconcellos e Landell, 2008; Hunsigi, 1993). As flores são carregadas em uma panícula de ramos abertos, comumente chamada de flecha. Cada flor contém anteras, que carregam o pólen masculino, e a célula do embrião feminino, com seu estigma, no qual o pólen cresce para fertilizar o óvulo. A semente é na verdade um fruto cariopse, elíptico, com cerca de 1,5 mm de comprimento e 0,5 mm de diâmetro transversal (Bull, 2000; Dinardo-Miranda, Vasconcellos e Landell, 2008).

Para o florescimento são necessárias algumas condições específicas de fotoperíodo, temperatura e umidade; assim, ele pode ser induzido ou inibido através de variações nas épocas de plantio e corte, localização das áreas de cultivo, uso de maturadores ou inibidores do florescimento, irrigação, adubação, manejo artificial do fotoperíodo, etc. Um fenômeno ligado ao florescimento altamente indesejável é a chamada “isoporização”, quando ocorre uma grande perda do teor de caldo no colmo em virtude da translocação de caldo e açúcares do colmo em direção à panícula (Dinardo-Miranda, Vasconcellos e Landell, 2008).

2.1.5. Fenologia

O ciclo da cana plantada, pode ser de 12 (cana de ano) ou 18 meses (cana de ano e meio). Após o primeiro corte, os ciclos passam a ser de 12 meses e são definidos como cana-soca ou soqueira. Em média, o ciclo produtivo da cana-de-açúcar é de cinco a seis anos, com quatro ou cinco cortes (Santos, 2016).

Durante estes ciclos os processos fisiológicos variam temporalmente de acordo com os estágios de desenvolvimento da planta (Figura 3), podendo ser classificados em brotação/emergência, perfilhamento, crescimento, maturação e florescimento (Dinardo-Miranda, Vasconcellos e Landell, 2008). Com relação ao primeiro estágio, na cana-de-açúcar, os brotos podem-se originar a partir de sementes (germinação) ou por propagação vegetativa (brotação). Nos plantios comerciais utilizando-se frações dos colmos adultos (toletes), contendo pelo menos uma gema viável. Neste caso, a brotação (germinação) consiste no desenvolvimento de órgãos já presentes de modo embrionário na gema, como os primórdios foliares e de raízes. A propagação por sementes só se processa após os cruzamentos orientados nos programas de melhoramento, visando à obtenção de novas variedades (Dinardo-Miranda, Vasconcellos e Landell, 2008; Marin, 2014; Moore e Botha, 2014).

Figura 3. Ilustração das fases fenológica da cana-de-açúcar. Adaptado de Moore e Botha, (2014)

A brotação das gemas depende de diversos fatores, entre eles a dominância apical, estado nutricional do tolete, posição da gema no colmo, posição da gema no sulco, tratamentos para prevenir doença, variedade e fatores climáticos (Aude, 1993). Dentre os últimos, as variedades diferem em seu grau de sensibilidade à temperatura, mas em termos gerais a germinação será muito lenta quando a temperatura do solo cair abaixo de 18 °C e será cada vez mais rápida conforme a temperatura se aproximará dos 35 °C. A germinação raramente ocorre em temperaturas abaixo de 11 °C e, mesmo entre 11 °C e 18 °C, a taxa pode ser muito lenta para evitar a morte dos brotos devido ao ataque de patógenos (Bull, 2000).

A brotação, assim como a germinação das sementes, é um processo biológico que, como todos os outros, consome energia; essa energia é originária da degradação de substâncias de reserva do tolete, através do processo de respiração. Por conseguinte, num período de aproximadamente 60 dias, as reservas dos toletes são fundamentais para a evolução do processo de brotação, e essa relação de dependência reduz-se gradativamente à medida que o sistema radicular se desenvolve, aumentando a superfície ativa de absorção de água e nutrientes do solo, produto da emergência que é o evento que segue à germinação, e que se dá quando as folhas atingem a superfície do solo e passam a ser visíveis, ocorre de 20 a 35 dias após do plantio (Aude, 1993; Dinardo-Miranda, Vasconcellos e Landell, 2008; Marin, 2009, 2014).

Na sequência, após a brotação das gemas, começam a se formar outros rebentos, os quais se denominam perfilhos, dando início ao segundo estágio fenológico, o perfilhamento, o qual ocorre na parte subterrânea e, no caso da cana-de-açúcar, é limitado (Dinardo-Miranda, Vasconcellos e Landell, 2008). Segundo Moore e Botha (2014) o perfilhamento é o processo de brotações laterais emergindo das gemas laterais de um colmo existente para formar colmos adicionais. Como o rendimento ótimo depende do estabelecimento de uma densidade de colmos suficiente, o perfilhamento pode ser um grande processo de aumento de produtividade esses brotos aparecem de 20 a 30 dias após a emergência do colmo primário (Marin, 2009).

Os rebentos originários das gemas dos toletes das mudas são denominados maternos ou primários. Considerando que esse rebentos primários também possuem gemas e região radicular na parte subterrânea, essas gemas desenvolvem-se em novos rebentos, formando os rebentos secundários. Os rebentos originários dos secundários serão os terciários, e assim por diante. Consequentemente, os perfilhos são geralmente produzidos em excesso do que a cultura pode sustentar até a colheita (Dinardo-Miranda, Vasconcellos e Landell, 2008; Moore e Botha, 2014).

Dentre os fatores que podem interferir no processo que compete com a cana-de-açúcar, há a variedade, a luminosidade, a temperatura, a nutrição, plantas daninhas, patógenos e a umidade adequada do solo (Dinardo-Miranda, Vasconcellos e Landell, 2008). Na fase do perfilhamento intenso são importantes também sob o ponto de vista do manejo da cultura, pois o fechamento precoce do dossel é indicativo da formação de uma população de plantas adequada, garantindo alta eficiência na absorção da energia solar e o controle das plantas daninhas, que não dispõem, nesta condição, de níveis mínimos de radiação para sua manutenção (Marin, 2014).

Após todos os perfilhos estarem formados inicia o estágio de crescimento da cana-de-açúcar; de modo geral, o crescimento é entendido em termos de alongamento, mas em seu sentido mais amplo ele também inclui aumento de massa e tamanho da planta. O alongamento do colmo ocorre quando o meristema intercalar produz células que se expandem subsequentemente. Desse modo durante a fase de crescimento, três processos concorrem para a formação de novas estruturas vegetais: divisão celular, diferenciação celular e alongamento celular (Aude, 1993; Marin, 2014; Moore e Botha, 2014). O alongamento do colmo durante esta fase é muito sensível à temperatura e umidade do solo. A temperatura base da cana-de-açúcar está entorno de 19-20°C, abaixo destas temperaturas não há crescimento vegetativo. Em solos no ponto de murcha permanente (teor de umidade do solo no qual as plantas não conseguem absorver água) ou solos mal drenados ocorre a paralisação do crescimento (Aude, 1993; Bull, 2000).

No quarto estágio fenológico, os colmos que sobreviveram à competição da fase de perfilhamento passam a acumular sacarose que provém da fotossíntese de forma mais intensa, dando início à chamada fase de maturação, assim a cana-de-açúcar está próxima ao completar seu ciclo diminuindo a assimilação (produção de glicose e frutose), paralisa o crescimento e inicia a concentração de açúcar até atingir valores aceitáveis pela indústria. As folhas tornam-se amareladas, as inferiores secam e os colmos adquirem a coloração característica da cultivar. O amadurecimento ou acúmulo de sacarose é um processo que se realiza entreó por entrenó. O entrenó que se forma primeiro acumula açúcar antes que os demais. A maturação é influenciada por fatores de clima, solo, cultivares e estado sanitário do canavial (Aude, 1993; Marin, 2014).

Segundo Marin (2014) agentes “amadurecedores” exógenos também são utilizados para iniciar o processo de maturação quando as condições ambientais não desencadeiam o início da fase de maturação e seu princípio está associado à redução no crescimento vegetativo sem, contudo, afetar a produção de fotoassimilados. Assim, na região Sudeste do Brasil, o desencadeamento do processo de maturação da cana-de-açúcar ocorre naturalmente no início do mês de maio, atingindo seu clímax no mês de outubro.

O último estágio fenológico o florescimento, de acordo com Marin (2014) em termos comerciais não é considerado como uma fase fenológica senão como uma etapa dentro do processo vegetativo da planta isso é devido, conforme citado anteriormente, representa uma ameaça para a produção comercial de cana de açúcar pelo risco de “isoporização”, com as consequentes perdas de qualidade da matéria-prima industrial. Consequentemente, segundo Dinardo-Miranda, Vasconcellos e Landell (2008) é importante detectar o período em que pode ocorrer o estímulo (o principal destes é o fotoperíodo) para que o meristema apical se modifique, deixando de produzir folhas e colmos,

passando a formar a inflorescência; assim para o hemisfério Sul, os meses nos quais haveria estímulo seriam os meses de fevereiro, março e abril.

2.1.6. Variedades

O objetivo principal dos programas de melhoramento de cana-de-açúcar é prover novas variedades que ampliem a produtividade de energia (açúcar, álcool e fibra), mais resistentes a doenças e adaptadas a diferentes tipos de solo e clima. Assim no Brasil existem mais de 500 variedades comerciais de cana, sendo que 15 ocupam 80% da área cultivada no Centro-Sul, a principal região produtora do país, responsável por mais de 90% da safra nacional o restante está no Nordeste (Dinardo-Miranda, Vasconcellos e Landell, 2008; Vasconcelos, 2018). Segundo Barbosa (2015) o Brasil conta com cinco programas de melhoramento genético para cana-de-açúcar, disponibilizando as atuais e futuras variedades para cultivo e possibilitando os melhores manejos varietais aos produtores, sendo as seguintes: Canavialis (variedades CV); Centro de Tecnologia Canavieira - CTC (variedades CTC, sucessor da Copersucar -variedades SP); Instituto Agrônomo de Campinas - IAC (variedades IAC); Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético – RIDESA (variedades RB); e Vignis (empresa voltada ao desenvolvimento de cana-fibra específica para acúmulo de biomassa).

O censo varietal realizado para o ano de 2017 (PMGCA, 2018) mostram que as variedades RB (RIDESA) predominam na área de cana-de-açúcar em São Paulo e Mato Grosso do Sul; ocupando o 64% da área cultivada com cana-de-açúcar, enquanto 31% utiliza variedades ligadas ao CTC e 2% para os programas do IAC e CV repetitivamente. Quanto às variedades, as principais são RB867515, RB966928, RB92579, RB855156, CTC-4 e RB855453, com 23 ; 13,6 ; 7,5 ; 5,7; 5,6 e 4,9% da área cultivada, respectivamente.

O programa RB teve início em 29 de julho de 1971 como Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-açúcar (PLANALSUCAR), com o objetivo de promover melhorias em campo e nas usinas de açúcar. O instituto foi organizado em cinco centros principais, espalhados pelas principais regiões produtoras de cana-de-açúcar no Brasil (Daros, Oliveira, Barbosa, 2015; Gazaffi et al., 2016). No ano 1990 foi encerrado o PLANALSUCAR, ocorrendo a transferência dos recursos humanos, das estruturas físicas e tecnológicas para as Universidades Federais de Alagoas (UFAL), Rural de Pernambuco (UFRPE), Viçosa-MG (UFV), São Carlos-SP (UFSCar), Ruraldo Rio de Janeiro (UFRRJ), Paraná (UFPR) e Sergipe (UFS), criando a RIDESA (Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético). Atualmente a RIDESA conta também com as Universidades Federais de Goiás (UFG), Mato Grosso (UFMT) e Piauí (UFPI) (Daros, Oliveira e Barbosa, 2015).

Dentre as cultivares desenvolvidas exclusivamente pela RIDESA, a primeira a ser amplamente adotada foi a RB92579, liberada em 2003 na região Nordeste brasileira pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Considerando que a maior adversidade para o cultivo da cana no Nordeste brasileiro é a irregularidade climática, ela foi desenvolvida para que haja uma melhoria no desenvolvimento agrícola das empresas. Desde a sua liberação, a RB92579 apresentou expressivas elevações das áreas colhidas pelas empresas nordestinas, em função de suas vantajosas produtividades agroindustriais, de 30% a 40% acima das outras variedades que eram mais cultivadas e 60% acima das cultivadas há duas décadas. Em unidades do Nordeste, tem-se observado elevadas produtividade agrícola da RB92579 (média acima de 80 Mg ha⁻¹) e elevadíssima produtividade quando sob irrigação plena (média acima de 140 Mg ha⁻¹). A RB92579 tem hábito de crescimento ereto, arquitetura foliar com pontas curvas, copa de volume regular e tonalidade intermediária, folhas de limbo largo e fraco serrilhamento do bordo, colmos com entrenós cilíndricos de comprimento e diâmetro médios de aspecto manchado com pouca cera, e gema do tipo

triangular. Apresenta uma ótima brotação na planta e nas socarias, com um alto perfilhamento, proporcionando ótimo fechamento de entrenós, floresce pouco, com uma velocidade lenta de crescimento, alta produtividade agrícola nas quatro primeiras folhas. É altamente responsiva à irrigação e muito eficiente no uso da água e apresenta boa recuperação após períodos de seca. Alto teor de açúcares totais recuperáveis (ATR), maturação média, longo PUI e médio teor de fibra. Amplas épocas de plantio (julho a janeiro no Nordeste e fevereiro a julho no Centro-Sul). Dificil despalha no período vegetativo e fácil na colheita. Resistente à ferrugem marrom e moderadamente resistente à ferrugem alaranjada e ao carvão; e intermediária à escaldadura das folhas e à podridão vermelha (Daros, Oliveira e Barbosa, 2015).

2.2. Importância do Silício

O Si é um componente onipresente e proeminente de plantas e seus ambientes, e desempenha um grande número de papéis na vida vegetal e nas culturas. As pesquisas e o desenvolvimento revigorados sobre o papel do Si na biologia vegetal trarão retornos consideráveis no conhecimento e sua aplicação no campo (Epstein, 2001). Desta forma, nos últimos 20 anos, a documentação científica sobre os benefícios do Si para as culturas ajudou a estabelecer a fertilização Si como uma prática agrônômica em muitas terras agrícolas em todo o mundo (Tubana, Babu e Datnoff, 2016).

Entretanto, a literatura geralmente relata 13 elementos essenciais para o crescimento das plantas; estes subdividem-se em seis macronutrientes, dentro dos quais nitrogênio, fósforo e potássio são considerados como nutrientes primários e cálcio, magnésio e enxofre como nutrientes secundários (Kingston, 2014). O Si geralmente não é considerado entre o grupo de elementos essenciais para o crescimento das plantas. Contudo dos elementos minerais encontrados nas sete das dez culturas mais importantes, o Si está em concentração acima de 1% de peso seco, quando comparado esses valores com aqueles para tais elementos como Ca (0,1-0,6%), S (0,1-1,5%) e outros mostra que o Si está presente em quantidades equivalentes àquelas de vários elementos de macronutrientes, e até mesmo excedendo-os na mais altos níveis (Bokhtiar *et al.*, 2012; Epstein, 1999; Guntzer, Keller e Meunier, 2012; Sahebi *et al.*, 2015). Neste sentido Hodson *et al.* (2005), fizeram uma revisão em estudos que relatam a concentração relativa de Si na parte aérea da plantas, em tecidos foliares ou não lenhoso, sobre 735 espécies vegetais. Entre estas as espécies cultivadas, destacam, o arroz (4,17%), trigo (2,46%), tomate (1,55%), sorgo (1,54%), cana-de-açúcar (1,51%), feijão (0,95%), melancia (0,84%), milho (0,83%), café (0,39%) e batata (0,15%). Tubana, Babu e Datnoff (2016) estimaram a quantidade de Si absorvidas em uma áreas de culturas, determinaram que as taxas de remoção de Si do solo podem ser até maiores que os nutrientes essenciais primários (por exemplo, P, K) especialmente para arroz (329 kg de Si ha⁻¹), beterraba (1.408 de Si ha⁻¹), cana-de-açúcar (160 de Si ha⁻¹) e trigo (108 kg Si ha⁻¹), considerando estas culturas como plantas de alto acúmulo de Si. Assim, embora o Si não seja essencial para as plantas superiores, pode aumentar a produtividade agrícola para algumas plantas (Raven, 2003).

Na planta, o Si absorvido tem efeitos benéficos relacionados, principalmente, na redução de danos causados por estresses bióticos (pragas e doenças) e abióticos (seca, metais pesados, salinidade) que, geralmente, ocorrem durante o desenvolvimento das plantas, porém, os mecanismos envolvidos ainda são pouco compreendidos, sendo variável para cada espécie (Camargo, 2016); por isso este elemento é considerado como um elemento benéfico (Figura 4). Em contraste a falta de prova documentada conduz pesquisadores para encontrar o papel adequado deste elemento nas plantas (Sahebi *et al.*, 2015).

Figura 4. Nutrientes essenciais e benéficos para a cana-de-açúcar. Adaptado do Kingston, (2014).

Vários trabalhos demonstraram que os efeitos do Si em condições normais são latentes, uma vez que, não são observadas modificações importantes nas plantas, entretanto sob condições de estresse, o Si provavelmente estimula o metabolismo da planta, tornando-a mais eficiente em responder a estímulos exógenos. Assim, dois processos principais que contribuem para a resistência ao estresse são comumente considerados (i) uma proteção física e mecânica proporcionada pelos depósitos de Si e (ii) uma resposta bioquímica que provoca alterações metabólicas (Luyckx *et al.*, 2017). Assim Kingston (2014) indica que dentre os efeitos benéficos do silício estão: maior resistência a certas doenças fúngicas; maior resistência ao ataque e exploração de cana pelos insetos entediante; assistência no controle da transpiração e tolerância à salinidade; concorrência com íons fosfato para sítios de sorção no solo; alívio da toxicidade de manganês. Além disso, o Si pode melhorar o estado dos solos, que contêm níveis tóxicos de metais pesados juntamente com outros elementos químicos. O silício minimiza a toxicidade de Fe, Al e Mn, aumenta a disponibilidade de P e aumenta a seca, juntamente com a tolerância ao sal nas plantas através da formação de tecidos silicificados nas plantas (Sahebi *et al.*, 2015).

Entretanto, os teores solúveis e disponíveis de Si às plantas podem ser baixos em alguns solos, nas regiões tropicais é caracterizada como baixa, variando de 0,1 a 1,6 kg de Si ha⁻¹ na camada superior de 20 cm do solo; devido principalmente, à sua mineralogia, textura e teor de argila, e ao processo de dessilificação comum em solos altamente intemperizados, ácidos, pobres em nutrientes essenciais (Oxisols, Ultisols), sujeitos a intensa lixiviação ou simplesmente devido ao fato de que a solubilidade da maioria dos minerais contendo Si nos solos é baixa. Entretanto, há solos em que o silício desempenha um papel subordinado, como aqueles derivados de material parental calcário e solos orgânicos (Camargo, 2016; Epstein, 2001; Tubana, Babu e Datnoff, 2016).

Por outro lado, o efeito benéfico do Si na produção é bem reconhecido, apesar do Si não ser considerado como um elemento essencial, uma vez que não constitui parte de qualquer metabólito vegetal, nem sua ausência causa qualquer dificuldade na conclusão do ciclo de vida das plantas (Vasanthi, Saleena e Raj, 2012). Neste sentido, Korndörfer; Nolla e Ramos (2005) afirmam que no Brasil vários estudos têm sido realizados com o objetivo de vincular o acúmulo de silício (Si) nas plantas com a resistência a doenças e a produtividade da cultura. Um dos efeitos benéficos do silício pode estar relacionado à influência que este exerce na absorção de outros elementos.

A fonte mais simples de ácido silícico é o quartzo (SiO₂) que reage com a água (SiO₂ + 2H₂O → H₄SiO₄) para formar ácido silícico (H₄SiO₄), o quartzo é pouco solúvel e, portanto, não controla a solução do solo Si, como resultado concentração de ácido silícico na maioria das soluções do solo deve ser derivado de aluminossilicatos como feldspatos e micas. Quando a solução do solo se torna supersaturada em ácido silícico, forma-se uma sílica amorfa

em vez de cristalina. A interação entre os minerais de silicato e a biosfera, impulsionada pela fotossíntese das plantas, equivale a um ciclo Si (Epstein, 2001).

O ciclo global do Si (Figura 5) está intimamente ligado ao ciclo global do carbono. Assim, atualmente o ciclo do silício despertou o interesse como uma estratégia para as mudanças climáticas, através do sequestro de carbono em ecossistemas agrícolas, devido aos processos biogeoquímicos envolvidos no ciclo do silício, com a dinâmica de fitólitos, durante a sua formação nos tecidos vegetais, os fitólitos podem absorver de 1 a 6% de carbono orgânico, e o intemperismo do silicato ($\text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$) em diferentes escalas de tempo, que libera dióxido de silício (SiO_2) e consome dióxido de carbono (CO_2) atmosférico (Blecker et al., 2006; Song, Müller e Wang, 2014). As taxas de consumo de CO_2 não são apenas controladas pelas condições litológicas, climáticas e hidrológicas, e pelo crescimento das plantas terrestres, mas também afetadas pelas atividades agrícolas, assim dentre algumas das estratégias para aumentar a produção agrícola e o sequestro de carbono juntamente com o ciclo Si, é o uso de culturas de raízes profundas e a fertilização de materiais ricos em Si (Song, Müller e Wang, 2014).

Figura 5. Ciclo do silício na fase planta-solo. adaptado de Cooke e Leishman, (2011).

Há um consenso geral sobre a captação do silício pela planta na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4), juntamente com a água (fluxo de massa), sendo posteriormente transportado pelo xilema através da corrente de transpiração e se acumula principalmente nas áreas de máxima transpiração (tricomas, espinhos, etc.) depositada em fitólitos na parede celular. O fitólito é um corpo discreto de sílica amorfa, contém cerca de 90% de sílica, 1 a 6% de carbono orgânico e vestígios de outros componentes, como alumínio e ferro, estão presentes na maioria das plantas, tipicamente perto das superfícies de evaporação depositado na forma de dupla camada de sílica e cutícula na epiderme das folhas e colmos, tornando-se imóvel quanto à redistribuição para outros órgãos que provoca um efeito de proteção mecânica (Blecker *et al.*, 2006; Camargo, 2016; Cooke e Leishman, 2011; Guntzer, Keller e Meunier, 2012; Korndörfer, 2007; Korndörfer, Nolla e Ramos, 2005; Song, Müller e Wang, 2014; Wang *et al.*, 2016). Quando a planta morre, é depositada no solo onde pode persistir por longos períodos ou se dissolver na solução do solo. O Si é reciclado através do pool de solo biogênico, como os fitólitos são muito mais solúveis do que os minerais primários e secundários de silicato, os quais muito importantes na ciclagem do Si (Cooke e Leishman, 2011; Haynes, 2017).

Em climas tropicais úmidos, onde se tem uma forte depleção de Si derivado de mineral litogênico e pedogênico, o Si derivado das plantas fornece quase todo o Si na solução do solo. Entretanto a produção agrícola está aumentando a quantidade de Si lábil em algumas áreas, mas diminuindo-a nos casos em que a biomassa é colhida e transportada para outros lugares. Ambos têm implicações para a disponibilidade de Si. O Arroz, trigo, milho e cana-de-açúcar acumulam muito mais fitólitos ($> 30 \text{ mg g}^{-1}$ de fitólitos) do que outras culturas ($< 10 \text{ mg g}^{-1}$). Assim a agricultura impacta no ciclo global de Si, semelhante ao ciclo P (depleção do solo) e o ciclo N (perda por lixiviação e escoamento). Por isso, Si não pode ser ignorado na agricultura (Cooke, DeGabriel e Hartley, 2016; Haynes, 2017; Song, Müller e Wang, 2014).

Aliado a isso, o Si é importante na mitigação de estresses abióticos e bióticos das plantas, mas muitos solos agrícolas são deficientes em Si disponível para as plantas, tornando necessária a suplementação com Si (Bokhtiar *et al.*, 2012; Sahebi *et al.*, 2015). A fertilização do silício por silicatos tem o potencial de mitigar os estresses ambientais e a depleção de nutrientes no solo e, como consequência, é uma alternativa ao uso extensivo de fitossanitários e fertilizantes NPK para manter a agricultura sustentável (Guntzer, Keller e Meunier, 2012). Ramouthar; Caldwell; Mcfarlane (2016) acharam que com um aumento no teor de Si nas folhas, sob condições controladas de estufa, ocorre uma redução na severidade da ferrugem marrom. Bokhtiar *et al.* (2012) reportaram que a aplicação de Si melhorou a eficiência fotossintética de plantas individuais, bem como aumentou a altura de plantas, e da produção de cana e de açúcar.

A cana-de-açúcar responde favoravelmente à adubação com Si, particularmente nos solos pobres nesse elemento (Si $< 18 \text{ mg kg}^{-1}$, extraído com ácido acético $0,5 \text{ mol L}^{-1}$). Em trabalhos de campo, observou-se um aumento médio de 14 Mg ha^{-1} de cana de açúcar com a aplicação de 4 Mg ha^{-1} de cimento no plantio da cana (Korndörfer, 2007; Korndörfer, Nolla e Ramos, 2005). Santos (2017) observaram que a aplicação de $1,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ da fluorita com óxido de silício aumentou em 20% a produção de colmos e de açúcar em cana planta. O uso de Si gerou também incremento linear na produção acumulada de colmos e também na de açúcar, mas até a dose estimada de $1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$.

Bokhtiar *et al.* (2012) observaram efeitos positivos do silicato de cálcio (CaSiO_3) no conteúdo de clorofila, nas propriedades de troca gasosa, na altura da planta, no acúmulo de matéria seca e na produção de cana-de-açúcar. Mostraram, também, que houve diminuição da concentração de Fe, Cu, Zn e Mn devido à aplicação do silicato de Ca, tanto nos tecidos foliares quanto no solo. Por outro lado, a aplicação de silicato de Ca melhorou o nível de outros nutrientes (P, K, S, Ca e Mg). Concluíram que o Si aplicado pode ser benéfico para a cultura de cana de açúcar e que este age no solo de várias maneiras.

Para alcançar a tolerância da planta, o Si promove a fotossíntese da planta pela favorável exposição das folhas à luz. Por outro lado, o papel deste elemento tem provado ser diferente em resposta ao estresse abiótico e biótico (Sahebi *et al.*, 2015). O Si absorvido proporciona muitos benefícios para as plantas. A sua deposição nas folhas promove melhoria do posicionamento das folhas para maior interceptação da luz solar, aumentando a capacidade fotossintética e a produtividade das culturas. A absorção de Si também é útil para reduzir o estresse causado pela falta de água, pois ele pode evitar a compressão dos vasos quando há altas taxas de transpiração pelas plantas (Camargo, 2016).

Não obstante as vantagens achadas deste elemento como nutriente benéfico na cultura da cana-de-açúcar, ainda há alguma discrepâncias em relação à sua interação com outros nutrientes em folhas e nas propriedades do solo (Bokhtiar *et al.*, 2012). Até mesmo na capacidade de armazenamento de Si ainda não está definida, porque em geral as plantas diferem em sua capacidade de acúmulo, inclusive genótipos de uma mesma espécie podem apresentar

diferentes conteúdos de Si, desta forma Deren, Glaz e Snyder (1993) observaram em 52 genótipos comerciais de cana-de-açúcar uma significativa variabilidade no conteúdo de Si nas folhas, determinando que a capacidade de acúmulo de Si está associado ao genótipo, sugerindo a possibilidade de seleção de cultivares com maior eficiência de acúmulo de Si.

Neste sentido, Camargo et al. (2017) e Sousa, Korndörfer & Wangen (2010) observaram que existe um aumento linear na absorção Si de acordo com a taxa de aplicação de silicato, independentemente do cultivar de cana-de-açúcar. Tal resultado demonstra que a cana-de-açúcar realmente responde a aplicação de doses de Si no solo. Assim, Vasanthi, Saleena e Raj (2012) estimam que em canaviais com 12 meses de idade, em um hectare, acumula-se cerca de 380 kg de Si ha⁻¹. Sousa, Korndörfer & Wangen (2010) verificaram que as plantas cultivadas na presença de 400 kg de Si ha⁻¹ apresentaram 60% mais Si no colmo do que aquelas mantidas na ausência de aplicação desse elemento.

Camargo, Rocha e Korndörfer (2013) e Camargo et al. (2010) mostraram que, o conteúdo de argila do solo pode influenciar na dinâmica do Si na solução do solo. Assim, acharam que a adição de Si como silicato de cálcio e magnésio em um solo com baixo conteúdo de argila (6%) aumenta o rendimento de colmos, e a quantidade de Si extraível. Porém o índice de recuperação do silício na planta incrementou com maiores valores de argila no solo após de três safras de cana-de-açúcar. Esses autores sugeriram que o fertilizante Si pode aumentar a disponibilidade e absorção de Si na cana-de-açúcar, com efeitos residuais, mesmo em solos argilosos. Além disso, o índice de recuperação de Si em culturas sucessivas de cana-de-açúcar é mais alto em solos argilosos. Após três safras de cana-de-açúcar, a aplicação de silicato de cálcio e magnésio pode induzir uma captação média de Si de 16,8 a 29,3%.

A razão para esta resposta das plantas, geralmente propiciando o aumento de rendimento, não é totalmente compreendida, mas vários mecanismos têm sido propostos. Alguns estudos indicam que as respostas de rendimento da cana para o silício podem estar associadas à indução de resistência a estresses bióticos e abióticos, tais como resistência a doenças e pragas, aumento da tolerância à Al, Mn e Fe, aumento da disponibilidade de P, redução da hospedagem de insetos, melhoria na posição da folha e do caule, maior resistência à geada, e melhoria na economia de água da planta (Savant *et al.*, 1999). Por outro lado, Bokhtiar et al. (2012) verificaram que as plantas tratadas Si conservam mais umidade devido à redução da perda de água por transpiração na cutícula, que é a camada que confere formação e espessura na parede das células epidérmicas. Neste sentido, Korndörfer; Nolla e Ramos (2005) sugerem que o acúmulo de sílica em órgãos de transpiração pode provocar a formação de uma dupla camada de cutícula de sílica, que diminui as necessidades de água das plantas, por meio da redução da transpiração. Camargo et al. (2017) observaram efeitos positivos da adubação silicatada sob a tolerância da cana-de-açúcar ao estresse hídrico, desta forma, aplicação de Si aumentou a produção de colmos e o rendimento de açúcar de cultivares sensíveis de cana-de-açúcar, mesmo quando cultivadas em condições de déficit hídrico, o que poderia ser útil para o plantio dessas cultivares em solos sujeitos a déficit hídrico em comparação com o tratamento sem déficit. A ausência de adubação com Si no solo diminuiu em 36% o rendimento de colmos da cultivar tolerante para. Portanto, a adubação com Si no plantio deve ser considerada mais uma ferramenta para reduzir os danos causados pelo déficit hídrico na cana-de-açúcar. Entretanto, no que se refere à interação da irrigação com as doses de silício, Chaves *et al.* (2013) observaram que há um efeito significativo de forma quadrática entre eles, com um aumento da produtividade de colmos com a aplicação crescente das doses de silício, e o uso das lâminas de irrigação contribui para aumentar a produtividade da cana-de-açúcar. A variedade da cana influencia na resposta da aplicação de Silício, assim é possível que cultivares intolerantes à seca, quando submetido ao estresse hídrico, experimentem uma resposta maior ao silício

(solúvel e/ou amorfa) para aumentar a resistência ao estresse em comparação com cultivares resistentes (Kvedaras *et al.*, 2007).

O impacto da sílica nas usinas de cana-de-açúcar é complicado pelo fato de que os colmos, os ponteiros, a palha e o sistema radicular da cana poder conter, por vezes, elevadas quantidades de minerais silicatados. Por conseguinte, é usual encontrar sílica em caldos, não apenas sob a forma solúvel, mas também como matéria coloidal e como matéria em suspensão, dependendo do tamanho da partícula. O impacto da sílica no processamento da cana-de-açúcar tem sido um pouco negligenciado, sobretudo em termos de qualidade do açúcar. Há, portanto, necessidade de se realizar mais trabalhos lidando com a sílica (Lionnet e Walthew, 2004).

2.3. Importância da adubação nitrogenada

Dada sua importância e a alta mobilidade no solo, o nitrogênio tem sido intensamente estudado, no sentido de maximizar a eficiência do seu uso. Para tanto, tem-se procurado diminuir as perdas do nitrogênio no solo (Bredemeier e Mundstock, 2000). Ainda há muito o que se discutir em relação à adubação mineral nitrogenada de plantio em cana-de-açúcar. No entanto, o que mais imediato se deve fazer é a identificação de características específicas de respostas ao manejo, em função de variedades e ambientes de produção (Penatti, 2013).

Penatti (2013) sugere que, dentre os fatores que interferem na reposta da cana planta ao nitrogênio (N), estão a mineralização da matéria orgânica do solo e dos restos culturais da própria cana, maior vigor do sistema radicular, a melhor fertilidade de solo associada à calagem, e à aplicação de vários produtos como torta de filtro, vinhaça, gesso, fixação biológica, além dos esterco de galinha e cama de frango. Porém, segundo Barth (2009) o uso de diferentes fontes de N não causa alteração na produtividade de colmos de cana-de-açúcar, independente das taxas de perda de N das mesmas. A produtividade da cana-de-açúcar aumenta com o aumento da dose de N. Contudo, a fonte nítrico-amoniacal propicia poucas perdas de N, quando comparada com a fonte amídica. Muchow *et al.* (1996) afirmam que o nitrogênio tem um efeito maior sobre as medidas comerciais da produção de cana (rendimento e concentração de sacarose dos colmos) do que sobre as medidas fisiológicas (biomassa do talo e concentração de sacarose em base de peso seco). Tanto o excesso quanto a deficiência de nitrogênio têm influência na qualidade tecnológica dos colmos. Os valores do índice de nitrogênio acumulado por massa de colmo produzido podem ser bastantes variáveis, dependendo de quais partes das plantas são computadas nos estudos, da época de amostragem, da variedade e das condições de cultivo (Dinardo-Miranda, Vasconcellos e Landell, 2008).

Vitti *et al.* (2007) observaram que, em torno de 40% do amônio da fonte nitrato de amônio, permanece no sistema solo-planta (raízes e rizomas e palha) como efeito residual para a safra seguinte, independentemente da dose de nitrogênio aplicada; neste experimento, as doses de N proporcionaram efeito linear altamente significativo na produtividade de colmos, da segunda soca até a terceira soca, mesmo sendo aplicada uma única dose de N. Contudo, Sartori (2010) observou que a fertilização nitrogenada de plantio contribui para o aumento da produção de colmos da primeira soca; não houve, entretanto, efeito residual da adubação nitrogenada de plantio na produção de colmos e nos parâmetros tecnológicos da segunda soca. Assim, Muchovej e Newman (2004) observaram em um canavial cultivado em solo arenoso no sul da Flórida relações positivas entre as taxas de fertilizante nitrato de amônio e o nitrogênio disponível no solo para a planta. Neste sentido, Butler *et al.* (2002) observaram que na África do Sul a absorção do nitrogênio pela cana-de-açúcar tem um comportamento variável de acordo com a estação do ano (inverno ou verão). Assim, determinaram que a aplicação dividida uniformemente do nitrogênio ao longo dos primeiros quatro meses de desenvolvimento da cultura leva a um uso mais produtivo e eficiente do nitrogênio.

Além disso, Uribe *et al.* (2013) afirmam que a adubação nitrogenada associada com o sistema de irrigação por gotejamento aumenta a produção de massa seca da cana-de-açúcar, com um aumento consequente da produção de colmos e de açúcar. Assim, Oliveira *et al.* (2014) observaram que as maiores produtividades de cana-de-açúcar eram alcançadas quando a reposição hídrica era de 100%, via irrigação por gotejamento subsuperficial, combinado com a adubação nitrogenada.

2.4. Relações entre silício e nitrogênio

As relações entre o nitrogênio (N) e silício (Si), variam de acordo com a espécie de planta. Gilpin, Davidson e Roberts (2004), estudando a relação do N com o Si em diatomáceas, observaram a maior concentração de clorofila A quando a relação foi superior a 2:1, porém acharam que o aumento da relação N:Si acima de 4:1 limitou o aumento de biomassa. No caso do arroz, a qual é uma das espécies cultivadas que mais absorve Si, vários autores (Baliza *et al.*, 2007; Mauad, Grassi Filho, *et al.*, 2003; Vidal, 2008) determinaram que o acúmulo de matéria seca, a produtividade de grãos e os teores de N na planta não foram influenciados pelas doses de Si. Mas, aumento das concentrações de N reduziu o teor de Si nos colmos e folhas. Ao contrário disso, o Si não alterou o acúmulo de N nos tecidos do arroz, sendo negativa interação N x Si para os teores de Si na planta e para a quantidade de Si acumulado pelas plantas. Assim, a adubação nitrogenada aumentou a absorção de nitrogênio na planta e promoveu maior produção de massa seca da parte aérea e de grãos de arroz. Segundo Mauad, Crusciol *et al.* (2003) a adubação nitrogenada ocasionou um perfilhamento excessivo, causando redução na porcentagem de colmos férteis, na fertilidade das espiguetas e da massa de grãos, encontrando que a adubação silicatada reduziu o número de espiguetas chochas por panícula e aumentou a massa de grãos sem, contudo, refletir na produtividade de grãos.

Entretanto, sabe-se que embora o nitrogênio seja um dos nutrientes mais exigidos pelas culturas, a aplicação de altas quantidades dos fertilizantes nitrogenados não conduz a aumentos significativos, apresentando implicações muitas vezes desfavoráveis. Os tecidos das plantas ficam tenros, susceptíveis à penetração de agentes externos, além de haver auto-sombreamento das plantas, com queda na taxa de fotossíntese e aumento do acamamento destas. Dentre os elementos não essenciais absorvidos pela planta de cana-de-açúcar, o silício é um dos que pode aumentar o rendimento desta, sobretudo em condições de altas doses de nitrogênio (Bastos, 2008a).

No caso da cana-de-açúcar, segundo Bastos (2008a) o silício é um dos que pode aumentar o rendimento, sobretudo em condições de altas doses de nitrogênio. Observou que, com o aumento das doses de N, ocorreu aumento do teor de silício na cana-de-açúcar; ou seja, a presença de Si no material corretivo, quando associado à adubação nitrogenada, diminuiu a concentração de Si no solo e aumentou o teor de Si na planta. Neste sentido, Keeping *et al.* (2015) verificaram que os adubos amoniacais aumentam a absorção de Si nas folhas e no caule, já que estes causam uma redução do pH na rizosfera, aumentando a solubilidade do Si; subsequentemente sugerem o uso de adubos de N amoniacal para melhorar a dissolução da escória aplicada e a liberação do Si disponível. Borges (2012) observou que com doses máximas de 160 kg ha⁻¹ de N independentemente do uso de Si, aumentaram a produtividade da soqueira da cana-de-açúcar, promovendo um aumento na produção de colmos, assim como na altura, matéria seca de folhas, e número de colmos, desta forma determinou que o uso do Si em conjunto com N não potencializa o efeito deste último na produção de colmos. Em quanto ao efeito da interação do N com adubação silicatada, sob o acúmulo de Si na parte aérea, determinou que a aplicação de N promoveu um ajuste quadrático no acúmulo de Si, atingindo ponto de máximo na dose de 69 kg de N ha⁻¹, respectivamente.

O uso de silicato granulado, juntamente com o NPK, é capaz de disponibilizar o Si próximo ao sistema radicular, favorecendo assim a absorção deste elemento pelas plantas, permitindo também reduzir o custo da fórmula

(Marafon e Endres, 2011). Silva (2014) observou que a interação entre doses de N e uso de escória promoveu melhorias no estado nutricional e aumentou o acúmulo de N e de Si na cana-de-açúcar, assim promoveu linear na produção de matéria seca da folha e quadrático na produção de matéria seca do colmo, atingindo valores máximos com a aplicação de escória de 27 Mg ha⁻¹ na dose de 102 kg ha⁻¹ N respectivamente. Fonseca (2011) determinou que uso da adubação nitrogenada incrementou o teor de sacarose e fibra de forma linear, entretanto, não houve efeito do Si nas variáveis tecnológicas da cana-planta.

Por outro lado, Keeping, Miles e Sewpersad (2014) avaliaram o efeito da interação do N e Si sob a infestação de broca e tripses. Eles observaram que o Si reduziu significativamente o dano pela broca, sendo relativamente maior para cultivares suscetíveis do que para os resistentes..

2.5. Produtividade da água

Com a atual crise da água, os recursos de água doce restringem a produção de alimentos em várias regiões, e a quantidade limitada de água deve ser usada de forma mais produtiva. Nesse sentido, quanto mais produzimos com a mesma quantidade de água, menor a necessidade de desenvolvimento de infraestrutura, menor a competição por água, maior a segurança alimentar local e mais água para uso agrícola, doméstico e industrial, e mais permanece em natureza (Descheemaeker *et al.*, 2013).

Portanto, na agricultura é lógico expressar o desempenho agrícola também em termos de produção de culturas por m³ de água utilizada (por exemplo, em kg m⁻³ ou \$ m⁻³), assim é definida a produtividade da água (PA), como a razão entre os benefícios líquidos da agricultura, à quantidade de água necessária para produzir esses benefícios, ou seja, a quantidade de biomassa vegetal produzida por unidade de água utilizada para essa produção, de diferentes anos, regiões, etc. Podendo ser analisada ao nível da planta, ao nível do campo, ao nível da parcela, ao nível do sistema e ao nível da bacia e em diferentes escalas de tempo, por uma estação ou por todo o ciclo da cultura (Bessembinder *et al.*, 2005; Descheemaeker *et al.*, 2013; Donoso *et al.*, 2014; Hamdy, Ragab e Scarascia-Mugnozza, 2003; Kumar e Dam, 2006; Molden *et al.*, 2007; Wichelns, 2015).

A maior PA resulta na mesma produção a partir de menos recursos hídricos, ou em uma produção maior dos mesmos recursos hídricos, o que é um benefício direto para outros usuários da água (Ragab Ragab, 2014). Em seu sentido mais amplo, reflete os objetivos de produzir mais alimentos, renda, subsistência e benefícios ecológicos a um custo social e ambiental menor por unidade de água consumida, podendo ser usado na avaliação da agricultura, florestal, pecuária e piscicultura. Os valores de PA fazem mais sentido quando as comparações relativas são feitas nas partes componentes do sistema agrícola, o período de tempo em que a PA é estimada é determinado pelo ciclo de produção agrícola que impulsiona o sistema (Descheemaeker *et al.*, 2013; Molden *et al.*, 2010; Sharma, Molden e Cook, 2015). Analisar a produtividade da água no nível da planta exigiria o conhecimento da biomassa total por unidade de água transpirada, e fazer o mesmo no nível do campo exigiria conhecimento do rendimento da cultura (kg ha⁻¹) ou retorno líquido da produção agrícola (R\$ ha⁻¹) contra a quantidade total de água aplicada ou a unidade de água esgotada (Kumar e Dam, 2006).

Sendo que Pereira *et al.* (2002), Pereira, Cordery e Iacovides (2012) e Vazifedoust *et al.* (2008) sugerem o uso da PA (kg m⁻³) como indicador do desempenho da irrigação, integrando a taxa de matéria seca rendimento e transpiração ao longo do tempo, isto é, a estação de crescimento, em relação ao rendimento da cultura, sendo que o denominador pode se referir ao uso total da água, incluindo a precipitação, ou apenas ao uso da água de irrigação. A qual pode ajudar a entender melhor como as diferentes culturas, os diferentes ambientes agroclimáticos e as

diferentes práticas de manejo da cultura podem influenciar a relação entre a produção agrícola e o consumo de água. O valor numérico da produtividade da água será, assim, o mesmo que o declive de um raio desde a origem até um ponto na função de produção de água da cultura pertinente, descrita em termos de água aplicada ou evapotranspiração (Frizzzone, Lima e Costa, 2014; Wichelns, 2015).

A produtividade da água depende de vários fatores, incluindo material genético das culturas, práticas de manejo da água, práticas agronômicas e incentivos econômicos e políticos para produzir. Ao estimar a PA, estamos interessados nos fluxos de água (chuva mais irrigação, ou apenas água da chuva na agricultura de sequeiro) e depleção de água (evaporação e transpiração) (Molden *et al.*, 2003).

Como a "produtividade da água (PA)" foi originalmente referida, na literatura da década de 1960, como "eficiência do uso da água (EUA)", parte da confusão na definição da PA vem do fato de que, embora as definições variem, a EUA geralmente leva em conta a entrada de água, enquanto a PA usa o consumo de água em seu cálculo, levando a que alguns pesquisadores a usaram de forma intercambiável a PA com a EUA, ambos os termos têm relevância aos objetivos econômicos dos agricultores. Durante os últimos 50 anos, o conceito original de "EUA" foi consideravelmente aprimorado para incluir "produtividade da cultura ou valor por gota de água" e na literatura recente mostra que o que antes era erroneamente definido como EUA foi renomeado em "Produtividade da Água" no início dos anos 80. A EUA interessa principalmente aos distritos de água ou agências de gestão, enquanto PA interessa mais agricultores e comunidade de pesquisa. A PA fala melhor para perspectivas ligando uso de água com níveis de produção e benefício econômico (Descheemaeker *et al.*, 2013; Levidow *et al.*, 2014; Ragab Ragab, 2014; Sharma, Molden e Cook, 2015).

Uma das maiores confusões parece permanecer no uso do EUA, ele tem sido usado para descrever uma série de observações cobrindo uma diversidade de escalas de tempo e de processo que variam de troca gasosa por folhas individuais por alguns minutos, até a resposta do rendimento de grãos a tratamentos de irrigação durante uma estação inteira (Sinclair, Tanner e Bennett, 1984).

A simples definição de qualquer eficiência em nossa vida diária é referida como uma razão ou porcentagem. Tecnicamente, a eficiência considera a taxa de aplicação física da água para o propósito desejado. Na agricultura, o valor depende principalmente da técnica (por exemplo, irrigação por gotejamento superficial), mas também do sistema de manejo, como o modo de aplicação da água ligada a esta técnica (curvas, sob demanda) e outros fatores (manutenibilidade) uso correto da tecnologia. Também usada frequentemente para avaliar o desempenho dos sistemas de abastecimento de água e as atividades de uso da água, contabilizando a onde ocorrem perdas em cada estágio à medida que a água se move do reservatório (perdas de armazenamento), transportada e entregue na fazenda (perdas de transporte), aplicada à fazenda (perdas de distribuição), armazenado no solo (perdas de aplicação) e finalmente consumido pelas culturas (perdas de gestão de culturas) para a produção. Indicando a quantidade de água desperdiçada no nível da parcela, da fazenda, do hidrante ou do sistema, definindo-a como a razão entre o acúmulo de biomassa, expressa como assimilação de dióxido de carbono, biomassa total da cultura ou grão da cultura, para água consumida, expressa como transpiração, evapotranspiração ou entrada total de água no sistema desviada de um rio ou outra fonte natural para a fazenda ou canal do projeto ou canais durante o mesmo período de tempo que pode ser instantânea, diária ou sazonal. Portanto, é uma porcentagem que indica quão bem uma técnica ou um modo de distribuição fornece água (Donoso *et al.*, 2014; Pereira, Cordery e Iacovides, 2012; Ragab Ragab, 2014; Sharma, Molden e Cook, 2015; Sinclair, Tanner e Bennett, 1984).

Considerando que a EUA na produção agrícola compara saída do sistema (como rendimento ou retorno econômico) para a evapotranspiração da cultura, a eficiência da irrigação também compara uma saída ou quantidade

de água retida na zona de raiz a uma entrada, como alguma medida de água aplicada. A eficiência da irrigação é o termo mais usado para descrever o quão bem a água está sendo usada. A EUA implica na captura máxima de umidade do solo para a transpiração, o que também envolve redução da transpiração não-estomática e perda mínima de água pela evaporação do solo. A eficiência da irrigação e a EUA continuam a ser parâmetros úteis e significativos, desde que sejam bem definidos e utilizados ao nível de agricultores individuais ou projetos de irrigação. Mas os aumentos locais na eficiência da irrigação nem sempre levam à redução da competição pela água ou ao aumento da produtividade geral da água na bacia (Blum, 2009; Molden e Sakthivadivel, 1999; Sharma, Molden e Cook, 2015; Zoebl, 2006).

Entretanto, o termo "PA" foi uma tentativa de mediar a complexidade predominante e outras limitações inerentes ao conceito existente de EUA, na definição da PA, é necessário especificar o produto (biomassa ou produção econômica) e o consumo que estamos nos referindo (transpiração, evapotranspiração, volume total de água, aplicada ou volume de irrigação), mas ambos não precisam ter as mesmas unidades. Os valores de produtividade da água fazem mais sentido quando as comparações relativas são feitas nas partes componentes do sistema agrícola. O período de tempo em que a produtividade da água é estimada é determinado pelo ciclo de produção agrícola que impulsiona o sistema. Quanto maior é a produtividade da água a partir dos mesmos recursos hídricos, mais eficiente será a cultura no uso da água, o que é um benefício direto para outros usuários que compartilham a mesma fonte de recursos hídricos (Barbosa, 2015; Frizzone, Lima e Costa, 2014; Ragab Ragab, 2014; Sharma, Molden e Cook, 2015; Steduto *et al.*, 2012).

Durante as décadas passadas, a ênfase na melhoria da gestão da água agrícola tem sido no aumento da EUA, mas mais recentemente é dada maior ênfase à produção de mais com relativamente menos água - aumentando a PA. Melhorar a EUA ou aumentar a PA agrícola é uma resposta crítica à crescente escassez de água, incluindo a necessidade de deixar água suficiente em rios e lagos para sustentar os ecossistemas e atender às crescentes demandas das cidades e indústrias. O aumento da PA é particularmente apropriado quando a água é escassa e é necessário obter todos os benefícios de outros insumos de produção, fertilizantes, sementes de alta qualidade, preparo de solo e formação de terras, e mão-de-obra, energia e maquinaria (Sharma, Molden e Cook, 2015).

Para evitar mal-entendidos, Pereira, Cordery e Iacovides (2012) sugerem que o termo "EUA" só deve ser usado para medir o desempenho da água das plantas e culturas, irrigadas ou não irrigadas, para produzir assimilados, biomassa e/ou rendimento. Quanto o termo "PA" deve ser adotado para expressar a quantidade de produto ou serviço produzido por uma dada quantidade de água utilizada, isto é, consumível e não consuntivo, tanto em irrigação quanto em usos não irrigados da água.

É normal representar a PA em unidades de kg m^{-3} , onde a produção agrícola e o uso da água são estimados em mm de água aplicada ou recebida de chuvas, convertida para $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ($1 \text{ mm} = 10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). Porém existem várias definições interrelacionadas de PA que são importantes em escalas e domínios de análises. As definições de PA diferem com base no histórico do pesquisador (Ali e Talukder, 2008; Molden *et al.*, 2003).

Assim, Liang *et al.* (2016) discriminam em produtividade total da água (PAT) como a produção da cultura por unidade total de água, incluindo irrigação e precipitação; e a produtividade da água de irrigação (PAI) como a produção da cultura por unidade de água de irrigação. Entretanto Perry *et al.* (2009) expande a expressão da PA, para um melhor entendimento de como diferentes culturas, diferentes ambientes agro-climáticos e diferentes práticas de manejo podem influenciar a relação entre a produção agrícola e o consumo de água, calculando a PA especificando o produto (biomassa ou rendimento) e seu consumo (transpiração ou evapotranspiração). Assim, expressa a PA, como produtividade da água da transpirada por biomassa, PATr, (kg de biomassa por m^3 de água transpirada);

produtividade da água evapotranspirada por biomassa, PAET, (kg de biomassa por m³ de água evapotranspirada); produtividade da água da transpirada por rendimento (kg de rendimento por m³ de água transpirada); produtividade da água da evapotranspirada por rendimento (kg de rendimento por m³ de água evapotranspirada).

A noção de PA também pode ser aplicada em um sentido mais amplo, atribuindo valores diferentes ao numerador. No sistema de produção agrícola, pode ser expressa em termos de rendimento total de matéria seca ou de sementes (ou grão) rendimento (kg) ou, quando se lida com culturas diferentes, rendimento pode ser transformado (Tabela 1) em unidades monetárias (ou seja, US \$), atributos sociais (por exemplo, empregos, alimentos, segurança), termos de calorias dos alimentos (por exemplo, kcal), valor proteico (kg de proteínas), termos de energia (por exemplo, MJ) ou atributos ambientais (por exemplo, seqüestro de carbono, biodiversidade) (Ali e Talukder, 2008; Donoso *et al.*, 2014; Molden *et al.*, 2010, 2003; Ragab Ragab, 2014; Sharma, Molden e Cook, 2015).

Tabela 1. Produtividade da água para alguns produtos agrícolas.

Produto	kg m ⁻³	Produtividade da água		
		\$ m ⁻³	Gramas de proteína m ⁻³	Calorias m ⁻³
Trigo (\$0,2 kg ⁻¹)	0,20-1,20	0,04-0,30	50-150	660-4.000
Arroz (\$0,31 kg ⁻¹)	0,15-1,60	0,05-0,18	12-50	500-2.000
Milho (\$0,11 kg ⁻¹)	0,30-2,00	0,03-0,22	30-200	1.000-7.000
Lentilha (\$0,3 kg ⁻¹)	0,30-1,0	0,09-0,30	90-150	1.060-3.500
Favas (\$0,3 kg ⁻¹)	0,30-0,80	0,09-0,240	100-150	1.260-3.360
Amendoim (\$0,8 kg ⁻¹)	0,10-0,40	0,08-0,32	30-120	800-3.200
Batata (\$0,1 kg ⁻¹)	3,00-7,00	0,30-0,70	50-120	3.000-7.000
Tomate (\$0,15 kg ⁻¹)	5,00-20,00	0,75-3,00	50-200	1.000-4.000
Cebola (\$0,1 kg ⁻¹)	3,00-10,00	0,30-1,00	20-67	1.200-4.000
Maça (\$0,8 kg ⁻¹)	1,00-5,00	0,80-4,00	Desprezível	520-2.600
Azeitonas (\$1,0 kg ⁻¹)	1,00-3,00	1,00-3,00	10,00-30,00	1.150-3.450
Tamaras (\$2,0kg ⁻¹)	0,40-0,80	0,80-1,60	8,00-16,00	1.120-2.240

Fonte: Adaptado de Molden *et al.*, (2007).

Na agricultura, estamos interessados em produzir mais com menos água porque a água é um fator limitante em muitas partes do mundo. A água é um bem econômico, porque temos que pagar e, em muitos casos, também temos que pagar enormes custos ambientais. Assim, o foco atual da PA evoluiu para incluir os benefícios e custos da água usada para a agricultura em ecossistemas terrestres e aquáticos. Denominandose produtividade econômica da água, a qual fornece uma ferramenta para atribuir valor e produtividade a todos os usos e usuários da água dentro de um domínio hidrológico, e não apenas àqueles pertencentes à agricultura irrigada. O "valor" pode se referir ao retorno econômico ou à nutrição, ou mais amplamente a qualquer outro benefício econômico e social (por exemplo, empregos, bem-estar, meio ambiente etc.) (Ali e Talukder, 2008; Amarasinghe e Smakhtin, 2014; Donoso *et al.*, 2014; Molden *et al.*, 2010; Molden e Sakthivadivel, 1999; Pereira, Cordery e Iacovides, 2012; Ragab Ragab, 2014; Sharma, Molden e Cook, 2015).

Com o aumento da escassez de água, o melhoramento do PA na agricultura não é apenas relevante, mas também muito crucial para atender às futuras demandas de água dos setores agrícola e outros, assim qualquer melhoria na PA das culturas terá um efeito positivo na produção de alimentos, benefícios socioeconômicos, benefícios ambientais ou na economia de água, para muitas regiões sob estresse hídrico onde a água é escassa em comparação com outros recursos envolvidos na produção, representando uma estratégia fundamental para alcançar a segurança alimentar e a sustentabilidade da água em um mundo com demandas crescentes (Amarasinghe e

Smakhtin, 2014; Brauman, Siebert e Foley, 2013; Descheemaeker *et al.*, 2013; Kumar e Amarasinghe, 2009; Molden *et al.*, 2010; Sharma, Molden e Cook, 2015).

Muitas tecnologias para melhorar o PA e a gestão de recursos escassos estão disponíveis, no entanto, a melhoria da PA exige que se explore não só o manejo da água, como também de outros fatores, tais como cultivares melhoradas, manejo da fertilidade e práticas culturais que influenciam no rendimento (Ali e Talukder, 2008; Frizzzone, Lima e Costa, 2014).

Entre as técnicas de melhoria mais promissoras e eficientes, estão: irrigação para otimizar o uso da água (estes incluem irrigação suplementar a chuva; irrigação deficitária, irrigação de precisão); manejo da fertilidade do solo; seleção de variedades tolerantes de culturas que estão bem adaptadas à seca e que economizem água para aumentar o potencial de rendimento genético das culturas, reduzindo o consumo de água, inclui o desenvolvimento de variedades que produzem mais massa por unidade de transpiração; substituição de culturas, mudar de uma cultura mais para uma menos consumidora de água; melhor manejo da água, melhorar a eficiência da distribuição de água e reduzir a perda de água; e conservação do solo e da água através de mínima labranza (Ali e Talukder, 2008; Amarasinghe e Smakhtin, 2014; Brauman, Siebert e Foley, 2013; Donoso *et al.*, 2014; Hamdy, Ragab e Scarascia-Mugnozza, 2003; Kang *et al.*, 2017; Molden *et al.*, 2007; Molden e Sakthivadivel, 1999; Perry *et al.*, 2009).

2.6. Produtividade da água para a cana-de-açúcar

Begum *et al.* (2012) verificaram que a formação de sacarose está diretamente relacionada com a fotossíntese. Os genótipos que produzem mais clorofila sob condição de estresse podem realizar mais fotossíntese, resultando em maior formação de sacarose. Cabral *et al.* (2012) observaram que, em cana de sequeiro, a evapotranspiração aumenta com o crescimento da energia disponível; quando a cobertura foi totalmente desenvolvida, e a máxima evapotranspiração da cultura aproximou-se da evapotranspiração de referência. Segundo Inman-Bamber e Smith (2005) a taxa de alongamento relativa do colmo e da folha da cana-de-açúcar, são extremamente sensíveis ao estado de água na cultura. Em consequência, o manejo da irrigação é necessário para sustentar altos rendimentos de sacarose. Assim para cana-de-açúcar, particularmente, tem-se uma ampla faixa de valores da produtividade da água (PA) que vão depender entre outros da variedade, idade da cultura, irrigação, assim aproximadamente varia desde 2,6 até 21 kg m⁻³. Como Steduto *et al.* (2012) que definiram limites de produtividade da água variando entre 3,5 a 5,5 kg m⁻³ de biomassa seca, a FAO (2018), para boas condições estão na faixa de 5 a 8 kg m⁻³. Barbosa (2015) estudando oito variedades sob quatro tratamentos de irrigação, não achou diferença significativa entre as variedades, observando um valor médio de 5,29 kg m⁻³. Silva *et al.* (2011) estudaram um sistema de produção da variedade RB92579, cana soca irrigada no Vale do São Francisco, observaram uma produtividade da água para colmos 5,36 kg m⁻³. Santos (2016) e Barros (2015), estudando o mesmos oitos cultivares em ciclos diferentes (cana-planta e cana-soca) determinaram uma PAB média de 5,71 kg m⁻³ e 7,28 kg m⁻³ respectivamente. Carr e Knox (2011) produto de uma revisão determinaram como valor referência da PA na cana-de-açúcar de 10 kg m⁻³, em Australia Kingston (1994) determinou que a faixa varia entre 7,8 e 12,2 kg m⁻³. Inman-Bamber e Smith (2005) fizeram uma revisão bibliográfica e encontram que os valores de PA podem variar de 8,37 kg m⁻³ a 20,94 kg m⁻³.

Um fator que influencia na PA da cana-de-açúcar é a idade da cultura, por conseguinte Olivier e Singels (2015a) em África do Sul, em um solo franco argila arenosa, bem drenada, por um período de quatro anos (uma planta (P) e três culturas de soca (R1, R2 e R3)), na cultivar N14, observaram que os valores médios de PA variaram de 10,4 kg m⁻³ no ciclo planta para 8,1 kg m⁻³ na soca R3. Entretanto Cabral *et al.* (2012) avaliaram a

evapotranspiração da cana-de-açúcar em dois ciclos consecutivos (planta-soca), determinaram que a PA variou entre 3,66 e 2,67 kg m⁻³, sendo que a idade da cana-de-açúcar interfere na PA. Da mesma forma Silva (2014), observou a PA em quatro cultivares de canas-de-açúcar irrigadas por gotejamento subsuperficial (IACSP955000, IACSP942094, IACSP942101, e SP791011) na primeira e segunda soca, observou que os valores de PA aumentaram com a idade do canavial, assim em todos os cultivares a segunda soca foi maior do que a primeira e em geral os valores médios entre as duas socas variou de 5,667 e 13,615 kg m⁻³.

Naturalmente a irrigação é um elemento que incrementa a PA, como Oliveira *et al.* (2011) constataram em um estudo com onze variedades (SP791011, RB813804, RB863129, RB872552, RB943365 RB72454, RB763710, SP78-4764, SP81-3250, RB867515 e RB92579) onde a irrigação plena proporcionou maior PA, com produção média de 6,98 kg m⁻³ de colmos a mais em comparação ao regime de sequeiro, um incremento de 99%, oscilando os valores sob irrigação plena entre 11,10 a 18,3 kg m⁻³, entretanto em sequeiro variaram de 5,96 a 7,89 kg m⁻³. Farias *et al.* (2008) em uma pesquisa na região norte-paraibana dos tabuleiros costeiros, cana-de-açúcar variedade SP791011, submetida a quatro tratamentos de irrigação, obtiveram o melhor desempenho na cana sob irrigação plena com 7,22 kg m⁻³, 3,23 kg m⁻³ superior ao regime de sequeiro com 3,99 kg m⁻³. Por seu lado Maschio (2011) avalia a PA em 24 variedades de cana-de-açúcar, submetidas à irrigação plena e ao déficit hídrico (30% de déficit), observou uma variação na PA em biomassa fresca de colmos na ordem de 16,22 a 29,21 kg m⁻³ em função das variedades e dos manejos de irrigação aplicados, sendo maior sob irrigação plena com uma variação média de 17,17 a 29,21 kg m⁻³, a despeito do tratamento de déficit observou variações de 16,22 a 28,39 kg m⁻³. Apesar disso, Gava *et al.* (2011) estudaram o manejo irrigado por gotejamento e no sequeiro, em dois ciclos de cultivo (cana-planta e cana-soca) em três cultivares de cana-de-açúcar (RB867515; RB855536 e SP80-3280) determinaram em geral a PA aumentou no sequeiro na cana-soca variando de 12,6 a 16,5 kg m⁻³ de acordo ao cultivar, explicando este fato a capacidade dos genótipos a tolerar o estresse hídrico.

Por sua vez Leal *et al.* (2017) estudaram o efeito da irrigação em conjunto a idade e o tipo de solo em 23 variedades de cana-de-açúcar, observando que a irrigação apresentou como era esperado um efeito positivo sob a PA, no caso dos solos os valores superiores de PA foram associados a maior conteúdo de argila, porém teve um declínio da PA com incremento da idade (ciclo), assim reportou os valores máximos sob irrigação plena em solos de textura argilosa no segundo ciclo com uma variação de 20,32 a 29,13 kg m⁻³, quanto a 30% de déficit em solos de textura franco-arenosa para o terceiro ciclo apresenta uma variação de 8,13 a 16,53 kg m⁻³. Coelho *et al.* (2012) estudando a produtividade de água em biomassa de colmo fresco para 24 variedades brasileiras de cana-de-açúcar submetidas a tratamentos de irrigação, observaram um efeito do tipo de solo sob a variação da produtividade dentro do tratamento de irrigação observaram uma variação de 18,05 a 29,21 kg m⁻³ no solo argiloso e 17,17 a 27,14 kg m⁻³ para as variedades que crescem em solos arenosos.

A produtividade da água na cana-de-açúcar pode-se expressada em relação ao rendimento de açúcar, assim trocando o numerador biomassa pela produção de açúcar, em kilogramas, obtém-se a produtividade da água para açúcar (PAA), segundo Carr e Knox (2011) o valor correspondente para a sacarose é de cerca de 1,3 kg m⁻³, a FAO (2018) sugere que os valores para ótimas condições podem oscilar entre 0,6 kg m⁻³ a 1 kg m⁻³; Steduto *et al.* (2012) sugere que a PAA varia de 1,3 a 2,2 kg m⁻³. Barbosa (2015) determinou em oito variedades submetidas a diferentes lâminas de irrigação apresenta PAA oscila entre 1,24 kg m⁻³ a 1,71 kg m⁻³. Santos (2016) encontrou valores médios de 1,53 kg m⁻³. Não obstante, Leal *et al.* (2017) e Leal (2012) utilizando o rendimento bruto de açúcar, apresenta valores de PAA sob irrigação plena variando de 1,97 kg m⁻³ a 2,78 kg m⁻³. Entretanto Coelho *et al.* (2012) estudando

quatorze variedades de cana-de-açúcar sob irrigação plena, em dois tipos de solos determinaram uma variação 1,95 a 3,84 kg m⁻³.

Maschio (2011) usando a açúcar total recuperável (ATR) como referência para a rendimento da açúcar determina a produtividade da água em biomassa de ATR (PAATR), obteve um efeito positivo da irrigação sob a PAATR, assim em solos argilosos sob irrigação plena observou uma variação de 2,39 a 3,53 kg m⁻³ e em solos franco arenoso no mesmo regime hídrico uma oscilação de 2,15 a 3,52 kg m⁻³, quanto a regime de déficit (30% de déficit), os valores variaram de 1,95 a 3,34 kg m⁻³ e 2,04 a 3,84 kg m⁻³ nos solos argilosos e franco arenoso respectivamente.

2.7. Produtividade da água para energia na cana-de-açúcar

Não é inquestionável que o uso da biomassa para a produção de energia seja ambientalmente superior ao uso dos recursos fósseis e que os impactos nos recursos hídricos sejam um dos vários impactos possíveis; tanto a produção de matéria-prima como a subsequente conversão para biocombustíveis de primeira geração, são aqueles baseados em tecnologias existentes, como o etanol, e como para os biocombustíveis de segunda geração, são baseados na conversão de materiais celulósicos (por exemplo, palha, gramíneas perenes ou madeira) em combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, podem afetar o estado da água de muitas maneiras diferentes (Berndes, 2013; McIsaac, 2014).

Em geral, o plantio de gramíneas perenes e culturas lenhosas de curta colheita, contribuem como uma estratégia para adaptação à escassez de água que pode usar a produção de biomassa para energia como uma ferramenta para aumentar a acessibilidade espacial e temporal dos recursos hídricos. Estas culturas perenes diferem da maioria das culturas em características físicas e práticas de gestão. Os resultados até agora implicam em muitos benefícios ambientais positivos associados à implementação da produção de matérias-primas de bioenergia usando essas culturas, embora os efeitos sobre o meio ambiente dependam do uso atual ou prévio da terra, da escala de plantio e das práticas de manejo aplicadas (Berndes, 2013).

As mudanças no uso da terra para produzir matérias-primas de biocombustível e as instalações para converter as matérias-primas em combustíveis líquidos podem ter impactos significativos na qualidade e quantidade da água em diferentes escalas. Isso devido a que os fluxos de recursos hídricos são mais influenciados quando a expansão da produção de biomassa dedicada à energia está associada à mudança no uso da terra, neste contexto a mudança de um estado anterior (por exemplo, floresta, pastagem, terras agrícolas usadas para produção de alimentos e fibras) novo uso da terra fornecendo matéria-prima de bioenergia (Berndes, 2013; McIsaac, 2014).

A cana-de-açúcar é a cultura de bioenergia mais eficiente, e representa uma fonte de energia renovável nas regiões tropicais e subtropicais, além disso, as ferramentas biotecnológicas para a melhoria dessa cultura estão avançando rapidamente. Em relação à produção de biocombustíveis, o Brasil possui várias vantagens devido ao seu grande território, posição geográfica, radiação solar e abundantes recursos hídricos, por isso, o Brasil destaca por ter desenvolvido como a primeira economia sustentável de biocombustíveis do mundo e é o líder da indústria de biocombustíveis; essa reputação é baseada em grande parte em sua indústria de cana-de-açúcar (Botha e Moore, 2014; Santos Esteves, Dos *et al.*, 2012; Scarpate, 2013; Wacławovsky *et al.*, 2010).

A cana-de-açúcar tem uma vantagem significativa sobre a maioria das outras culturas potenciais de biomassa, devido à sua longa história de pesquisa e desenvolvimento industrial e da infraestrutura existente atualmente usada para a produção tradicional de açúcar. A infraestrutura agrônômica inclui sistemas de larga escala

para plantio, cultivo, irrigação, fertilização, controle de ervas daninhas, controle de pragas e doenças e colheita. A infraestrutura de processamento inclui usinas de açúcar, que também são operações de grande escala, às vezes ligadas a instalações de produção ou refino. A indústria da cana-de-açúcar, tal como está hoje, evoluiu para maximizar a produção de sacarose e obter benefícios econômicos do melaço e do bagaço. A combustão do bagaço para produzir calor e eletricidade é uma tecnologia de 1G (primeira geração) produz formas de energia de valor relativamente baixo, difíceis de serem distribuídas. A eletricidade produzida pela usina é usada para abastecer a usina e a área de produção agrícola associada. O excesso de eletricidade da fábrica é vendido na rede elétrica para fornecer renda adicional. A maioria das usinas de cana-de-açúcar é autossuficiente e possui gerentes bastante conhecedores da gestão de custos de energia e dos mercados. A fermentação dos açúcares no melaço também é uma tecnologia de 1G, mas produz bioetanol, um combustível de transporte líquido, de maior valor e fácil distribuição. No entanto, pode haver um maior potencial nas tecnologias de conversão 2G (segunda geração) para usar biomassa de cana-de-açúcar para produzir biocombustíveis líquidos de maior valor (Botha e Moore, 2014).

Esta produção de energia pode ser afetada pelas variações da disponibilidade hídrica no ambiente de produção, influenciando diretamente as taxas de crescimento da cultura e no balanço de energia. (Santos Esteves, Dos *et al.*, 2012). Assim, a água é implicitamente considerada em estudos potenciais de bioenergia convencional, uma vez que a quantidade de precipitação e as características da água do solo, são dois dos parâmetros que determinam a adequação para a produção de bioenergia. (Gheewala, Berndes e Jewitt, 2011). Neste sentido, Barbosa *et al.* (2015) determinaram que o déficit hídrico pode reduzir a energia acumulada nas plantas de cana-de-açúcar em aproximadamente três vezes.

Como a água se tornou reconhecida como uma questão chave em relação ao desenvolvimento da bioenergia (e uso da terra em geral), vários indicadores e ferramentas de avaliação foram propostos para incluir a perspectiva da água nas análises e para ajudar no desenvolvimento de estratégias e no planejamento do uso da terra. (Gheewala, Berndes e Jewitt, 2011). Assim, a energia gerada pode ser associada a água investida para sua produção, neste sentido, é possível determinar a produtividade da água para energia (PAE) como a relação da energia gerada pela biomassa área da planta e a água usada em sua produção. Dentre os poucos trabalhos que avaliam a PAE, encontram-se o desenvolvido por Leal (2012) que determinou em média de 23 variedades uma sob irrigação plena uma PAE média para tres ciclos de $113,13 \text{ MJ m}^{-3}$. Maschio (2011) e Coelho *et al.* (2012) estudando a produtividade da água em energia total da parte aérea de diferentes variedades, observou uma variação na PAE na ordem de 101,17 a $159,54 \text{ MJ m}^{-3}$.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido em uma casa de vegetação instalada na área experimental do Departamento de Engenharia de Biosistemas (LEB) da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) em Piracicaba, no Estado de São Paulo, nas seguintes coordenadas geográficas: 22° 42' 39,2" de latitude Sul e 47° 37' 44,4" de longitude Oeste (SIRGAS 2000 Datum), com uma altitude de aproximadamente de 548 m (Figura 6).

Figura 6. Localização da área do experimento.

A casa de vegetação é constituída em seu interior de três vãos conjugados em formato arco, com 3 m de pé direito, resultando uma área total de aproximadamente de 480 m²; tem cobertura de filme de polietileno transparente, com espessura média de 100,0 µm e laterais fechadas com tela tipo “sombrite” preta, com aproximadamente 50% de interceptação da radiação global, e com um rodapé de concreto de 0,20 m de altura. Dois tanques reservatórios localizados na parte externa da estrutura, disponibilizaram um volume de 0,5 m³ para a aplicação de agroquímicos (adubos e defensivos) e outro com um volume de 5 m³ para suprir as necessidades de irrigação; este último era abastecido continuamente pelo próprio sistema de abastecimento do Departamento.

O vão Sul da casa de vegetação estava ocupado com vasos plantados com café, o Norte plantado de amendoim e o vão central, onde foi conduzido o experimento, com uma área aproximada de 160 m², possuía 56 caixas de fibrocimento (sendo considerada a caixa como unidade experimental) distribuídas em quatro fileiras de 14 caixas. Cada caixa apresenta dimensões de 1,08 m de comprimento, 0,92 m de largura e 0,65 m de altura; com um área e volume aproximados de 1 m² e 0,5 m³ respectivamente. Cada caixa estava preenchida com uma camada de 0,05 m de pedra brita do nº 2, manta geotêxtil da marca “Bidim” e uma camada de solo devidamente homogeneizado de 0,60 m; possuía um poço de observação composto por um tubo de PVC 25 mm (DN) perfurado e revestido com a mesma manta geotêxtil, para mensurar a possível ocorrência de saturação (Figura 7).

Figura 7. Unidade experimental e sua disposição no interior da casa de vegetação.

3.2. Delineamento experimental e tratamentos

O ensaio iniciou-se com o plantio das mudas em bandejas em 8 de julho do 2015, encerrando em 30 de junho de 2016 com início da colheita. A variedade de cana-de-açúcar utilizada no experimento foi definida principalmente por ser uma variedade desenvolvida para cultivo irrigado; assim sendo, utilizou-se a variedade RB92579 (RB75126 x RB72199), que foi desenvolvida pelo programa de melhoramento da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA).

O delineamento experimental adotado foi o de blocos inteiramente aleatorizados, com 4 blocos completos; os tratamentos foram arrançados em esquema fatorial nitrogênio-silício ($4 \times 3 + 2$), sendo quatro doses de nitrogênio 25N, 50N, 100N e 150N (15, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹ respectivamente), três doses Silício 50Si, 100Si e 150Si (175, 350 e 525 kg ha⁻¹ respectivamente); e 2 tratamentos adicionais, sendo um 60 kg ha⁻¹ de nitrogênio e o outro 350 kg ha⁻¹ de silício, totalizando-se assim 14 tratamentos e 56 parcelas experimentais. As doses de Si foram estabelecidas como um valor extraído da revisão bibliográfica (Camargo, Júnior e Korndörfer, 2011; Camargo, Korndörfer e Wyler, 2014; Crusciol *et al.*, 2014; Korndörfer, 2007; Korndörfer, Nolla e Ramos, 2005; Korndörfer, Pereira e Camargo, 2002b; Marafon e Endres, 2011; Santos, 2017; Silveira Júnior *et al.*, 2003; Sousa, Korndörfer e Wangen, 2010), isto devido a que ainda não existe um nível máximo de absorção de Si pela cana-de-açúcar. Entretanto as doses de N foram definidas de acordo com as recomendações de Raji *et al.* (1997). As parcelas experimentais foram compostas por seis plantas (touceiras) alocadas em uma caixa, gerando um estande de 336 plantas (Tabela 2 e Figura 8).

Tabela 2. Esquema da distribuição dos graus de liberdade (G.L.) para as fontes de variação, de acordo com o delineamento experimental.

Fontes de variação	G.L.
Bloco	3
Adicional 100% Nitrogênio x Adicional 100% Silício	1
Nitrogênio	3
Silício	2
Nitrogênio x Silício (Fatorial)	6
Fatorial x Adicionais	1
Resíduo	39
Total	55

Figura 8. Croqui da distribuição dos tratamentos no experimento em blocos inteiramente aleatorizados em esquema fatorial nitrogênio-silício (4x3+2).

Os dados experimentais foram submetidos a análise de variância com teste de Tukey, a 5% de significância, para comparar as médias dos tratamentos adicionais com as médias dos demais tratamentos. Para análise dos dados, foi avaliada a normalidade dos dados por meio de teste de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$), e a homogeneidade pelo teste de Bartlett ($p > 0,05$). Posteriormente os dados foram submetidos a análise de variância considerando o fatorial por meio do Teste F (ANOVA); e para os valores de F significativos ($p < 0,05$) foram realizadas comparações de médias pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância (Box et al., 2005). Todas as análises foram realizadas utilizando o software SAS versão 9.3 (SAS Institute, Cary NC).

3.3. Solo

O solo utilizado para o preenchimento das caixas foi um solo que ocorre na região de Piracicaba-SP, classificado como Latossolo Vermelho Amarelo, fase arenosa, série Sertãozinho. As características químicas foram determinadas mediante estudo em laboratório. Para tanto, com o uso de um trado, foram tomadas amostras aleatórias compostas das camadas de 0 a 20 m, 20 a 40 m e 40 a 60 m de profundidade dentro da caixa, enviadas para o laboratório de Análise de Solos do Departamento de Ciência do Solo (ISO) da ESALQ-USP, obtendo-se os valores apresentados na Tabela 3, os quais foram usados para o manejo da adubação.

Tabela 3. Caracterização química do solo utilizado no experimento.

Profundidade (m)	pH CaCl ₂	M.O. (g dm ⁻³)	P	S	Fe (mg dm ⁻³)	Na	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V	N			Si
														Total	NH ⁴⁺	NO ⁻³	
														(mg.kg ⁻¹)			
0,00 – 0,20	6	22	27	26	22	285	1,4	34	11	18	46,4	64,4	72	1400	14	11	8
0,20 – 0,40	5,8	21	24	67	27	305	0,9	30	14	20	44,9	64,9	69	1820	14	42	9
0,40 – 0,60	5,9	23	30	67	100	315	1,1	31	16	20	48,1	68,1	71	1540	11	39	8

Métodos: M.O. – Dicromato/colorimétrico; P, K, Ca e Mg – Resina; S – Ca(H₂PO₄)₂; Fe – DTPA; Na – duplo ácido; H+Al – SMP; N total, NH⁴⁺ e NO³⁻ – digestão sulfúrica/Kjeldahl; Si – CaCl₂

As características físico-hídricas do solo (Tabela 4) foram determinadas tomando amostras indeformadas de solo das três camadas antes descritas; estas foram enviadas para o Laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia de Biosistemas (LEB) da ESALQ-USP.

Tabela 4. Caracterização físico-hídrica do solo utilizado no experimento.*

Profundidade	Capacidade de campo (θcc)	Ponto de	Porosidade total (%)	Capacidade de água disponível	Densidade do solo	Densidade das partículas	Frações granulométricas		
		murcha permanente					Areia	Silte	Argila
		(θpmp)							
(m)		(cm³ cm⁻³)		(mm)		(g cm⁻³)	%		
0,00 – 0,20	0,23	0,11	44,44	24,22	1,50	2,70	75,10	7,80	17,10
0,20 – 0,40	0,23	0,10	44,44	25,62	1,50	2,70	74,50	8,00	17,50
0,40 – 0,60	0,24	0,13	34,62	21,76	1,70	2,60	74,40	8,60	17,00

*Métodos de determinação segundo EMBRAPA (1997).

3.4. Manejo da adubação

Com base nos resultados da análise química de solos (Tabela 3), a adubação foi realizada seguindo as recomendações de Raij et al. (1997) para uma produtividade mínima esperada de 150 Mg ha⁻¹. Aplicou-se no sulco de plantio a dose de 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 40 kg ha⁻¹ de K₂O, usando como fonte superfosfato simples e sulfato de potássio, respectivamente.

À exceção dos tratamentos sem nitrogênio, o nitrogênio foi aplicado em forma de nitrato de amônio, de acordo com os níveis dos tratamentos de 7,5; 15; 30 e 45 kg ha⁻¹, respectivamente. Os fertilizantes potássicos e o nitrogenado restantes para cada tratamento foram aplicados ao longo do crescimento da cultura via fertirrigação (Tabela 5), parcelados em sete vezes ao longo do ciclo da cultura, dissolvidos diretamente no tanque de fertirrigação e aplicados em cada tratamento via gotejamento (Andrade Júnior *et al.*, 2012; Dalri e Cruz, 2008; Quintana, 2010; Silva, N. F. da, Cunha, Teixeira, Soares e Moura, 2015; Silva, N. F. da, Cunha, Teixeira, Soares, Moura, *et al.*, 2015).

Para prover o Si foi usado Agrosilício Plus (25% Ca, 6% Mg e 10,5% Si). Para que o Ca e o Mg não interferissem nos resultados, os tratamentos com doses inferiores a 525 kg ha⁻¹ de silício receberam uma complementação com calcário (33,61% Ca e 2,71% Mg) e óxido de magnésio (52% Mg), de tal forma que a quantidade total de Ca e Mg aplicadas nos tratamentos fosse igual, seguindo as recomendações de Camargo; Rocha; Korndörfer, (2013) (Tabela 6). Os adubos foram distribuídos manualmente e incorporados na parte superior a 0,20 m do solo, trinta dias antes do transplante das mudas (Figura 9).

Tabela 5. Fracionamento da dose de nitrogênio (N) e potássio (K₂O), em %, ao longo dos meses de condução do experimento.

Nutrientes	Dias após o transplântio das mudas						
	120	140	160	180	200	220	240
N (%)	2	2	2,5	15	16	20	21
K ₂ O (%)	2	2	3	12	18	20	20

Tabela 6. Correção calcítica e magnesiana complementar para cada parcela experimental, de acordo com a tratamento de silício.

Tratamento de Silício (Si, kg ha ⁻¹)	Agrosilício Plus		Calcário		MgO	Total	
	Ca	Mg	Ca	Mg	Mg	Ca	Mg
	kg ha ⁻¹						
0	0,0	0,0	1250,0	100,8	199,2	1250,0	300,0
175	416,7	100,0	833,3	67,2	132,8	1250,0	300,0
350	833,3	200,0	416,7	33,6	66,4	1250,0	300,0
525	1250,0	300,0	0,0	0,0	0,0	1250,0	300,0

Figura 9. Detalhes da aplicação de adubos e corretivos nas parcelas: Agrosilício Plus (A), dosagem e pesagem dos adubos (B), distribuição dos adubos em cada parcela (C) e aplicação (D).

Complementar ao manejo dos adubos aplicados no solo e visando prevenir deficiências de micronutrientes, aos 147 DAT foi aplicado 130 ml de CanaMicros® através de sistema de microaspersão, diluídos em aproximadamente 500 L de água. Após a aplicação o sistema continuou funcionando, aplicando só água para limpeza do sistema e melhoria de distribuição dos micronutrientes no dossel.

3.5. Manejo da Irrigação

As irrigações foram realizadas por meio de um sistema de irrigação localizada por gotejamento, utilizando emissores do tipo autocompensante com vazão nominal de 0,002 m³ h⁻¹ (Figura 10-A). Em cada uma das 56 parcelas experimentais foram instaladas duas linhas laterais de 5 emissores espaçados em 0,20 m cada, totalizando 0,010 m³ h⁻¹ por linha (Figura 10-B); assim sendo, uma vazão instalada por parcela de 0,02 m³ h⁻¹. O final de linha utilizado em

cada pedaço de aproximadamente 1 m foi fechado usando um final de linha com porca (Figura 10-C); para correção da curvatura do tubo gotejador, mostrado na Figura 5-B; as linhas foram fixadas na parcela usando-se haste de bambu amarradas a cada final de linha.

As linhas de derivação do sistema foram compostas por micro tubos de polietileno DN 8 mm; já a linha principal foi composta por um tubo de PVC DN 25 mm e a ligação entre a linha principal e a linha de derivação foi feita por meio de um painel vertical. Desse modo, cada parcela tinha seu registro de esfera de forma que a irrigação pudesse ser realizada de forma independente (Figura 10-E, F e G). A pressão do sistema foi fornecida por um conjunto motobomba (KSB Hydrobloc 0,5 cv 3450 rpm) (Figura 10-H), utilizando-se uma tubulação de PVC DN 25 mm na sucção e no recalque do conjunto; a pressão de serviço do sistema de irrigação foi igual a 0,196 Mpa, sendo monitorada com um manômetro de Bourdon com glicerina.

Figura 10. Detalhes do sistema de irrigação: emissor tipo autocompensante (A), distribuição das linhas laterais na parcela (B), vista geral da distribuição dos microtubos desde o painel de controle para todas as parcelas (C e D), detalhes da montagem dos microregistros no painel de controle (E e F), vista geral do painel de controle (G), especificações técnicas da motobomba monobloco usada no experimento (H).

A água usada no experimento foi armazenada em um reservatório com uma capacidade de 5 m³, sendo abastecido por duas fontes, uma delas o reservatório de água potável do Departamento de Engenharia de Biosistemas (LEB), e a outra proveniente de outro reservatório com a mesma capacidade que fazia a coleta de água de chuva. Adicionalmente a estes reservatórios, contava-se com uma caixa de água de 0,5 m³ destinada para aplicações da fertirrigação.

O funcionamento do sistema de irrigação foi avaliado medindo-se a variação da descarga do emissor (q_{var}), e calculando-se os coeficientes de uniformidade de Christiansen (1942), (CUC) e de distribuição (CUD), utilizando a metodologia apresentada por Kamar *et al.* (2015) e Andrade *et al.* (2017), utilizando-se 3 emissores por linha em cada parcela, com um tempo de coleta de 6 minutos (Figura 11).

Figura 11. Detalhes da avaliação hidráulica do sistema de irrigação.

Desta forma, como é mostrado na Tabela 7, obtiveram-se variações na descarga entre 18,30 e 3,46 %, encontrando-se dentro do limite de 20% sugerido por Wu; Terry e Hiler, (1979). Os valores de CUC médios dos tratamentos foram equivalentes a 95,94%, considerando-se aceitáveis pelo critério de Bernardo; Soares e Mantovani, (2006); a média do CUD foi de 93,71 %, sendo classificado por Bralts e Edwards (1986) como bom; a variação geral encontra-se entre 87,93 e 96,81 %. Assim, o sistema de irrigação foi considerado dentro dos limites aceitáveis para aplicação satisfatória da água.

Tabela 7. Desempenho hidráulico do sistema de irrigação por gotejamento utilizado no experimento: vazão média do emissor (Q), variação da vazão média do emissor (qvar), Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD).

Tratamento	Q (l h ⁻¹)	qvar (%)	CUC (%)	CUD (%)
25%N-50%Si	1,88	17,54	94,24	92,14
25%N-100%Si	1,75	8,98	95,55	94,26
25%N-150%Si	1,72	11,71	96,07	91,56
50%N-50%Si	1,92	5,89	97,11	95,42
50%N-100%Si	1,79	5,47	95,23	92,25
50%N-150%Si	1,95	16,09	92,54	87,93
100%N-50%Si	1,90	3,46	98,20	96,81
100%N-100%Si	1,79	18,30	95,04	93,99
100%N-150%Si	1,71	9,06	96,41	94,82
150%N-50%Si	1,72	7,99	97,02	96,17
150%N-100%Si	1,86	6,40	97,68	96,01
150%N-150%Si	1,87	8,78	96,41	95,40
100%N	1,78	11,66	96,04	94,16
100%Si	1,83	11,46	95,68	90,96
Média	1,82	10,20	95,94	93,71
Desvio-padrão	0,08	-	-	-
Coeficiente de variação (%)	4,32	-	-	-

Durante a condução do experimento foi necessário a instalação de um sistema de microaspersão, instalado acima do dossel da cultura, com o objetivo de facilitar as aplicações dos defensivos agrícolas, assim como os fertilizantes foliares. Foram instaladas duas linhas a uma altura acima dos 2 m, com 7 microaspersores tipo bailarina, espaçados 1,5 m cada, com uma pressão de serviço de 0,196 MPa, uma vazão de 0,043 m³ h⁻¹ e 2,8 m de raio de alcance.

O manejo adotado para a irrigação foi via solo, controlando-se o conteúdo de umidade do solo, repondo o consumido pela planta em função da capacidade de campo do solo, medindo-se a tensão da água no solo por meio do uso de tensiômetros. Neste sentido, foram instalados tensiômetros em duas caixas por tratamento a três profundidades quais sejam, 0,15 m, 0,30 m e 0,50 m representando as camadas de 0,0 - 0,20 m, 0,20 - 0,40 m e 0,40 - 0,60 m, respectivamente (Figura 12-A). Os dados da leitura foram coletados usando-se um tensímetro digital de punção (Figura 12-B) calibrado com um manômetro de coluna de mercúrio no Laboratório de Solos e Qualidade de Água do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ; essas leituras foram realizadas com um intervalo de 2 dias.

Figura 12. Detalhes dos tensiômetros instalados nas unidades experimentais: esquema de profundidades de instalação dos tensiômetros (A), vista geral dos tensiômetros na parcela (B), e detalhe do tensímetro digital de punção usado nas leituras (C).

A conversão do potencial matricial atual da água no solo (Ψ_m) obtido pelos tensiômetros para o conteúdo umidade volumétrica (θ), foi realizado aplicando as equações 1 e 2, usando os dados da Tabela 8, como os parâmetros da equação de van Genuchten, (1980).

$$\psi_m = L + hc \quad (1)$$

Em que:

ψ_m - potencial matricial de água no solo, kPa;

L - leitura no tensiômetro, kPa; e

hc - pressão equivalente à altura da coluna de água no tensiômetro, de 3,0, 5 e 7,0 kPa para os tensiômetros que representam as camadas de 0,00- 0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, respectivamente.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha |\psi_m|)^n]^m} \quad (2)$$

Em que:

θ - umidade volumétrica em função do potencial mátrico, cm³ cm⁻³;

- θ_r - umidade volumétrica residual do solo, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;
 θ_s - umidade volumétrica do solo saturado, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;
 m e n - parâmetros de regressão da equação, adimensional;
 α - parâmetro com dimensão igual ao inverso da tensão, kPa^{-1} ; e
 Ψ_m - potencial matricial atual da água no solo, kPa.

Tabela 8. Valores dos componentes da equação de van Genuchten, (1980) para o Latossolo Vermelho Amarelo, fase arenosa, série Sertãozinho, usado no experimento.

Profundidade	θ_s	θ_r	α	m	n
(m)	($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	(kPa^{-1})		
0,0-0,20	0,421	0,098	1,3464	0,18	2,718
0,20-0,40	0,412	0,085	1,5708	0,165	2,503
0,40-0,60	0,374	0,122	1,1291	0,275	1,562

As lâminas de irrigação (LI) destinadas a repor a umidade do solo até a capacidade de campo (θ_{cc}), foram determinadas em cada tratamento com os dados de umidade estimados acima, resultando na somatória das lâminas exigidas por cada camada de solo (0,00-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m) calculadas por intermédio da equação 3 a seguir.

$$L_I = \sum_{i=20}^{60} (\theta_{cci} - \theta_i) Z_i \quad (3)$$

Em que:

L_I – lâmina necessária para elevar a umidade do solo até capacidade de campo, mm;

θ_{cci} - umidade volumétrica na capacidade de campo para a camada i, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

θ_i - umidade volumétrica atual estimada pela equação 2 para a camada i, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; e

Z_i – espessura da camada i, mm.

A seguir, conhecida a lâmina de irrigação necessária para cada tratamento, foi calculado o tempo de irrigação usando os dados obtidos no teste de uniformidade empregando-se a Equação 4.

$$T_I = \frac{60 L_I A}{Q E_a} \quad (4)$$

Em que:

T_I – tempo de irrigação, minutos;

L_I – lâmina necessária para elevar a umidade do solo até capacidade de campo, mm;

A – área da superfície de solo da parcela experimental (considerando-se como 1 m^2);

Q – vazão para cada tratamento (Tabela 6), l h^{-1} ; e

E_a – eficiência do sistema para cada tratamento (Tabela 6), decimal.

Por último, para facilitar o processo de maturação, a irrigação foi suprimida totalmente 10 dias antes do início da colheita (Drying off), cujo obtivo foi potencializar a produção de sacarose, limitando o crescimento vegetativo.

3.6. Monitoramento meteorológico

Tendo em vista que o experimento foi conduzido dentro de uma casa de vegetação, com irrigação garantindo a disponibilidade da água, as condições ambientais em parte foram reflexo das condições externas ao experimento, fazendo-se necessário um monitoramento meteorológico o qual foi realizado com ajuda de uma estação meteorológica automática Scientific Campbell (Figura 13) instalada no interior da casa de vegetação. Está

estação registrava a radiação global com um sensor Piranômetro (LP02-L12 Campbell Sci) e um sensor Vaissala (HMP45C-L12 Campbell Sci) para temperatura e umidade relativa do ar, ambos sensores instalados a uma altura de 2 m. Os dados eram armazenados a cada minuto e integrados a cada 15 minutos por meio de um sistema de aquisição de dados (Datalogger Campbell CR 1000) e integrados de forma diária para seu uso posterior nos cálculos de manejo de irrigação.

Figura 13. Estação meteorológica automática Scientific Campbell, instalada no interior da casa de vegetação.

3.7. Produção das mudas

A origem do material utilizado para a produção de mudas (RB92579) do experimento foi a RIDESA/UFSCar (Araras-SP), tendo-se assim garantia do material genético, da sanidade e de que os colmos eram propícios para propagação (Figura 14-A). A metodologia para a produção das mudas foi realizada seguindo as recomendações do Landell *et al.* (2012) utilizando sistema nomeado Mudas Pré-Brotadas (MPB). Os rebolos foram plantados no dia 8 de julho de 2015, em 13 bandejas plásticas de 32 células, com um volume aproximado de 190 cm³ cada, preenchidas com substrato (Figura 14-B, C e D); obtiveram-se assim 416 mudas, 80 a mais do que as necessárias para o experimento. A produção dessas mudas foi conduzida em casa de vegetação; com objetivo de manter a umidade do substrato, irrigações diárias (de aproximadamente 5 mm dia⁻¹) foram realizadas (Figura 14-C).

O transplântio das mudas foi realizado em 22 de novembro de 2015, quando as mudas tinham entre 30 a 40 cm de altura, com um número de folhas expandidas entre 4 e 5 (Figura 14-E), sendo plantadas 6 mudas por parcela, a uma profundidade de 0,15 m, distribuídas a uma distância aproximada de 0,30 m das laterais da parcela e 0,31 m entre si (Figura 14-F).

Figura 14. Detalhes da produção de mudas: material obtido na RIDESA/UFSCar (A), plantio dos rebolos nas bandejas (B), irrigação das mudas (C), vista geral das mudas (D), controle da altura para transplântio (E) e vista geral das mudas transplantadas (F).

3.8. Condução da cultura

Depois de transplantar nos vasos as plantas foram monitoradas para se verificar sua sanidade. O controle das plantas daninhas foi realizado com capinas manuais periódicas, para diminuir a competição pela água e os nutrientes durante o desenvolvimento das plantas. Contudo, houve incidência de lagartas (*Spodoptera frugiperda*) principalmente nos blocos 1 e 4 (Figura 15-A e B), e pulgões (*Melanaphys sacchari*) de forma geral (Figura 15-C e D). Para controle da primeira foi aplicado 0,5 ml de Certero®, aos 18 e 58 DAT utilizando-se uma bomba costal de 20 litros, entretanto para a segunda aplicou-se 20 g de Actara®, aos 190 DAT; neste caso, devido ao crescimento da cultura, a aplicação foi realizada por meio do sistema de microaspersão. Durante a condução do experimento não foi registrada nenhuma doença que pode causar danos ao experimento.

Figura 15. Detalhes da incidência de pragas: plantas com ataque de lagartas (A e B), e folhas com presença de pulgões (C e D).

Dentre as adversidades acontecidas durante o experimento, pode-se destacar que antes do transplântio das mudas, em Piracicaba-SP ocorreram chuvas fortes no período de 25 de agosto a 11 de setembro de 2015, que somado a um problema com a calha pluvial da casa de vegetação, ocasionou o alagamento das parcelas do bloco 3 41, 42, 43, 44 dos tratamentos 100%N-150%Si, 50%N-50%Si, 100%N e 100%N-100%Si respectivamente (Figura 16-A, B e C), atrasando o transplântio das mudas. Estes problemas foram resolvidos temporariamente com a drenagem das parcelas (Figura 16-D), e permanentemente com o concerto da calha e a instalação de um sistema de coleta da água da chuva.

Entretanto, devido ao crescimento das plantas, estas atingiram altura do teto dentro da casa de vegetação e começaram a sofrer um processo natural de tombamento; para mitigar esse problema, na procura de que as plantas ficassem eretas, estas foram amarradas entre si e aos arames de suporte interno dentro da casa de vegetação com ajuda de fitilhos plásticos (Figura 16-E e F).

Figura 16. Algumas adversidades ocorridas ao longo do experimento: parcelas alagadas (A, B e C), drenagem das caixas (D) e vista geral das plantas asseguradas com fitilho plástico (E e F).

3.9. Colheita e variáveis analisadas no experimento

A colheita do experimento foi realizada a partir do dia 30 de junho de 2016 (282 DAT), se estendendo até 8 de julho de 2016 (290 DAT). Colheu-se bloco a bloco, começando no bloco 4 e acabando no bloco 2 (Figura 17 A e B), aproximadamente 6 parcelas por dia (36 touceiras). Estes trabalhos foram realizados com ajuda de mais de 12 pessoas, entre alunos de Pós-Graduação e Graduação da ESALQ, e também estagiários da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN e do Instituto Federal Goiano.

O processo da colheita foi um trabalho e iniciou-se com a contagem, corte (Figura 17-B), ensacamento e pesagem dos perfilhos improdutivos por touceira dentro de cada parcela, considerando-se improdutivos aqueles que não tinham colmo desenvolvido. A seguir colheu-se os perfilhos produtivos, separando folhas verdes, folhas secas, bainhas, ponteiros e colmos. Cada parte foi identificada, pesada e armazenada em sacos de papel, obtendo-se assim a Biomassa Fresca dos Colmos (BFC), pesando-se a matéria fresca dos colmos de cada parcela. Os ponteiros foram

usados para avaliar clorofila e área foliar; os colmos identificados tiveram medidos seu diâmetro e comprimento e depois passaram pela análise da tecnológica (Figura 17-D e E).

Amostras de perfilhos improdutivos, bainhas, folhas verdes e secas, foram desidratadas em estufa elétrica com ventilação forçada de ar com temperatura de 65 °C até atingir peso constante, obtendo-se assim a biomassa seca das amostras (Figura 17-F). Determinou-se a Biomassa Seca da Parte Aérea das plantas (BIOM) como a soma das folhas, bainhas, ponteiros e perfilhos improdutivos; no caso dos colmos, como mais adiante será explicado, a matéria seca foi estimada em função de seu conteúdo de umidade.

Figura 17. Detalhes da colheita do experimento: vista geral das plantas no momento da colheita (A), corte das plantas (B), vista geral da altura dos colmos (C), colmos separados para biometria (D e E), e amostras dentro da estufa elétrica (F).

As análises tecnológicas foram realizadas no Laboratório de Solos e Qualidade de Água do Departamento de Engenharia de Biosistemas (LEB) da ESALQ. A metodologia usada para as determinações dos parâmetros: Brix do caldo (B), Pol do caldo (S), Pureza aparente do caldo (Q), Teor de açúcares redutores do caldo (AR), Fibra da cana-de-açúcar (F), Pol da cana (PC), Açúcares redutores da cana (ARC), Açúcar total recuperável (ATR), seguiu a prescrito em CONSECANA (2006). Dessa forma, como apresenta-se na Figura 18, depois de colhidos, os colmos foram medidos (Biometria) em seus diâmetros (mm) e comprimentos (cm), usando a metodologia de Sinclair et al. (2005); assumindo que os mesmos assemelham-se a um cilindro, calculou-se os seus volumes (cm^3); (Figura 17 D e E). Selecionaram-se dois colmos por parcela para posteriormente tritura-los (Figura 19-A), utilizando um desintegrador de cana (Engehidro DCE-2600). Em seguida, passados por um homogeneizador (Figura 19-B) de cana (Engehidro HCE-250), desse material homogeneizado foi tomada uma amostra de 0,5 kg para ser comprimido a uma pressão de 24,52 MPa durante um minuto (Figura 19-C e D), empregando-se uma prensa hidráulica (MA098 CANA - Marconi S). O caldo (CA) obtido no processo (Figura 19-E e F) foi armazenado em um becker plástico de 600 ml para ser usado nas determinações do °Brix do caldo (B) (Figura 19-I) e das leituras sacarimétricas (S) (Figura 19-H). O sólido restante (bagaço), denominado como bolo úmido (PBU), foi colocado em um recipiente descartável de alumínio (marmitta) onde foi pesado, para ser desidratado, conseguindo-se depois a pesagem o bolo seco (PBS).

Figura 18. Fluxograma que resume as análises tecnológicas: em que BFC, Biomassa Fresca dos Colmos; CA, caldo da BFC; PBU, peso do bolo úmido; S, leituras sacarimétricas; B, °Brix do caldo e PBS, peso do bolo seco.

Figura 19. Detalhes da análise tecnológica: trituração e hominização das amostras de (A e B), vista geral da prensa hidráulica MA098 CANA - Marconi S (C), caldo extraído (CA) da amostra e bolo úmido (D, E e F), processo de clarificação e filtragem das amostras (G), sacarímetro digital Autopol I Rudolph W (H), refratômetro portátil digital de bancada Rudolph 147 E (I) e registro das leituras dos °Brix do caldo e sacarimétricas (J).

3.9.1. Sólidos solúveis do caldo ou Brix do caldo (B)

Para a determinação do Brix do caldo (°Brix) (teor de sólidos solúveis em porcentagem, à base de peso de caldo), com uma amostra de 10 ml do volume do caldo CA extraído (CA), foi medido o °Brix do caldo usando um refratômetro portátil digital (Figura 19-I) de bancada (Rudolph 147 E) com correção automática de temperatura (20°C).

3.9.2. Porcentagem em massa de sacarose aparente do caldo ou Pol do caldo (S)

Uma amostra de 200 ml do CA foi utilizada para determinar a porcentagem em massa de sacarose aparente do caldo ou Pol do caldo (S). Para isso, o CA foi submetido a um processo de clarificação utilizando aproximadamente 6,0 g de mistura clarificante à base de alumínio (Figura 19-G e H); posteriormente agitada e filtrada, foi realizada leitura sacarimétrica - LAI (°Z) utilizando-se um sacarímetro digital (Autopol I Rudolph W); para converter em equivalente de subacetato de chumbo LPb (°Z), foi utilizada a equação (5):

$$LP_b = 1,00621 LAI + 0,05117 \quad (5)$$

em que:

LPb-leitura sacarimétrica equivalente à de subacetato de chumbo, °Z; e

LAI-leitura sacarimétrica obtida com a mistura clarificante à base de alumínio, °Z.

Foi determinado o Pol do caldo (S), usando os valores de B e LPb previamente calculados usando a equação 6:

$$S = LP_b (0,2605 - 0,0009882 B) \quad (6)$$

em que:

S - pol do caldo, %;

LPb - leitura sacarimétrica equivalente à de subacetato de chumbo, °Z; e

B - brix do caldo, °Brix.

3.9.3. Pureza aparente do caldo (Q, %)

A pureza aparente do caldo (Q) é definida como a relação entre o Pol do caldo (S) e Brix do caldo (B), previamente determinados; é calculada pela equação (7):

$$Q = 100 \left(\frac{S}{B} \right) \quad (7)$$

em que:

Q - pureza aparente do caldo, %;

S – teor de sacarose aparente no caldo, %; e

B - brix do caldo, °Brix.

3.9.4. Fibra da cana-de-açúcar (F, %)

Com os dados do peso úmido (PBU) e seu respectivo peso seco (PBS), a fibra da cana-de-açúcar foi determinada pela equação (8):

$$F = \frac{[(100 \cdot PBS) - (PBU \cdot B)]}{[5(100 - B)]} \quad (8)$$

Em que:

F – fibra da cana-de-açúcar, %;

PBS – peso do bolo seco, g;

PBU – peso do bolo úmido, g; e

B - brix do caldo, °Brix.

3.9.5. Teor de Açúcares Redutores do caldo (ARcaldo, %)

O teor de açúcares redutores do caldo (ARcaldo), em porcentagem à base de peso de caldo, é função da pureza (Q), sendo determinado pela equação (9):

$$AR_{caldo} = 3,641 - 0,0343Q \quad (9)$$

Em que:

AR_{caldo} - teor de açúcares redutores do caldo, %;

Q - pureza aparente do caldo, %;

3.9.6. Açúcares Redutores da Cana (ARcana, %)

O teor de açúcares redutores da cana (ARcana), depende do ARcaldo e da percentagem de fibra (F), sendo calculado com a equação (10):

$$AR_{cana} = AR_{caldo}(1 - 0,01F)(1,0113 - 0,00575F) \quad (10)$$

Em que:

AR_{cana} - teor de açúcares redutores da cana, %;

AR_{caldo} - teor de açúcares redutores do caldo, %; e

F – fibra da cana-de-açúcar, %;

3.9.7. Açúcar Total Recuperável (ATR, kg Mg⁻¹)

O açúcar total recuperável (ATR), depende por sua vez do teor de sacarose aparente da cana ou POL da cana (PC), que pode ser determinado através da equação (11):

$$PC = S(1 - 0,01)(1,0313 - 0,00575F) \quad (11)$$

Em que:

PC – teor de sacarose aparente na cana, %;

S – teor de sacarose aparente no caldo, %; e

F – fibra da cana-de-açúcar, %.

Conhecido o PC, o ATR pode ser determinado como a relação entre o PC e o ARcana, definido pela equação (12):

$$ATR = (10PC \cdot 1,05263 \cdot 0,905) + (10AR_{cana} \cdot 0,905) \quad (12)$$

Em que:

ATR - açúcar total recuperável, kg Mg⁻¹ ;

PC – teor de sacarosa aparente na cana, %;

ARcana - teor de açúcares redutores da cana, %; e

1,05263 e 0,905 – são coeficientes estequiométricos de conversão da sacarose em açúcares redutores e coeficiente de recuperação para uma perda industrial de 9,5%, respectivamente.

3.9.8. Produtividade de colmos por hectare (TCH, Mg ha⁻¹)

Com a biomassa fresca dos colmos (BFC), previamente determinada no momento da colheita, a produtividade de colmos por hectare (TCH) foi extrapolada considerando a metodologia de Barbosa (2015) o qual

considera que, devido às dificuldade de extrapolar os valores de um cultivo em ambiente protegido com seu semelhante no campo e para evitar o efeito “bouquet”, na determinação do TCH deve ser considerada uma média do TCH entre a área da parcela (1,02 m²) e área total disponível útil para o dossel das plantas, contemplando-se os corredores (1,1 m²), já que a primeira tende a superestimar e a segunda a subestimar os valores de TCH; por causa disso o TCH ficou determinado pela equação (13):

$$TCH = \frac{\left(\frac{10BFC}{1,02}\right)\left(\frac{10BFC}{1,1}\right)}{2} \quad (13)$$

Em que:

TCH – produtividade de colmos por hectare, Mg ha⁻¹;

BFC – Biomassa fresca de colmos, kg;

10 – conversor de unidades de kg m² para Mg ha⁻¹; e

1,02 e 1,1 – são as áreas de solo de cada parcela e a área disponível para o dossel das plantas respectivamente, m².

3.9.9. Rendimento Bruto de Açúcar (RBA)

O rendimento bruto de açúcar (RBA), representa a produção de açúcar por unidade de área (Mg ha⁻¹), levando-se em consideração a TCH e o ATR previamente calculados; é determinado pela equação (14):

$$RBA = \frac{(ATR \cdot TCH)}{1000} \quad (14)$$

Em que:

RBA - rendimento bruto de açúcar, Mg ha⁻¹;

ATR - açúcar total recuperável, kg Mg⁻¹; e

TCH – produtividade de colmos por hectare, Mg ha⁻¹;

3.9.10. Umidade do colmo (Umidade, %)

A umidade dos colmos foi determinada para obtenção da matéria seca dos colmos, derivado da matéria fresca menos o conteúdo de água; esta matéria seca forma parte da Biomassa Seca da Parte Aérea das plantas. Em sua determinação foi usada a equação (15):

$$Umidade = 100 - F - \left[B \left(1 - \frac{F}{100} \right) \right] \quad (15)$$

Em que:

Umidade – teor de umidade do colmo, %;

F – fibra da cana-de-açúcar, %; e

B – brix do caldo, °Brix.

3.9.11. Produtividade da água (PA)

A produtividade da água para a cana-de-açúcar foi analisada como o uso eficiente da água para os diferentes produtos que poderiam ser obtidos desta cultura; assim sendo, foi calculada a produtividade da água para açúcar (PAA), para biomassa (PAB) e para energia total da parte área (PAE); todas elas relacionadas com o volume total de água aplicado em cada parcela (VT) , determinado por sua vez como a somatória das irrigações ao longo do experimento.

3.9.12. Produtividade da água para açúcar (PAA, kg m⁻³)

A produtividade da água para açúcar (PAA) foi determinada em função da quantidade total de açúcar produzida em cada parcela (AT_{par}) e o volume total de água aplicado em cada parcela (VT), sendo calculada pela equação (16):

$$AT_{par} = ATR \frac{BFC}{1000} \quad (16)$$

Em que:

AT_{par} – açúcar total produzido na parcela, kg;

ATR - açúcar total recuperável, kg Mg⁻¹; e

BFC – biomassa fresca de colmos, kg.

Determinada a AT_{par}, na sequência foi calculada a produtividade da água para açúcar (PAA), usando a equação (17):

$$PAA = \frac{AT_{par}}{VT} \quad (17)$$

Em que:

PAA - produtividade da água para açúcar, kg m⁻³;

AT_{par} – açúcar total produzido na parcela, kg; e

VT – volume total de água aplicado na parcela, m³.

3.9.13. Produtividade da água para biomassa (PAB, kg m⁻³)

A produtividade da água para biomassa (PAB) foi estimada baseada na relação entre a BIOM e o VT, representada pela equação (18):

$$PAB = \frac{BIOM}{VT} \quad (18)$$

Em que:

PAB - produtividade da água para biomassa, kg m⁻³;

BIOM – biomassa seca da parte área das plantas, kg; e

VT – volume total de água aplicado na parcela, m³.

3.9.14. Produtividade da água em energia total da parte área (PAE, MJ m⁻³).

Para a determinação da produtividade da água em energia total da parte área (PAE), foi necessário estimar os valores da energia do palhço (Epalhço), energia do bagaço (Ebagacho), energia do açúcar (ERBA) e energia total da parte aérea (ETOTA), todas elas medidas em MJ m². Para isso foram consideradas as seguintes relações de poder calorífico segundo Vásquez (2015), para 1 kg de biomassa seca da planta como: 18,29 MJ, 17,53 MJ, e 16,61 MJ para bagaço, palhço e ATR, respetivamente.

Definidos os valores da energia da parte área a PAE, foi calculada com a equação (19)

$$PAE = \frac{ETOTA}{VT} \quad (19)$$

Em que:

PAE - produtividade da água para energia total da parte área, MJ m⁻³;

ETOTA – energia total da parte área das plantas, MJ; e

VT – volume total de água aplicado na parcela, m³.

3.9.15. Índice de clorofila Falker (ICF)

O índice de clorofila Falker (ICF) foi determinado usando um Clorofilog (CFL1030 Falker), registrando a clorofila total (Clorofila A+B) expressa Índice de Clorofila Falker (ICF). Realizaram no momento da colheita três medidas em duas plantas por cada parcela; essas medidas foram tomadas no terço médio da folha +1 (seguindo o sistema “Kuijper”). No caso de uma planta apresentar a folha +1 completamente seca ou todas as folhas secas, optou-se por seguir o critério de Barbosa (2015).

3.9.16. Índice de colheita com base na biomassa aérea (ICa)

O índice de colheita com base na biomassa aérea das plantas foi determinado como a relação da massa de açúcar total produzida na parcela (ATpar) e a biomassa seca da parte aérea (BIOM), usando a equação (20):

$$IC_a = \frac{AT_{par}}{BIOM} \quad (20)$$

Em que:

ICa – índice de colheita da parte aérea;

ATpar – açúcar total produzido na parcela, kg; e

BIOM – biomassa seca da parte aérea das plantas, kg.

3.9.17. Determinação da área foliar (AF)

A área foliar foi determinada com ajuda de um integrador de área foliar LI-COR modelo LI 3100; as leituras foram realizadas em dois perfilhos representativos de cada parcela. Para determinar a área foliar total da parcela, utilizou-se as relações entre a área foliar do ponteiro com a massa de folhas do ponteiro medido, e a massas de folhas verdes e ponteiros da parcela, mediante a equação (21):

$$AFt = \frac{(MP_p \%F_p + MFV_p) AFm}{MFP_m} \quad (21)$$

Em que:

AFt – área foliar total da parcela (m²);

MPp — massa fresca do ponteiro na parcela, g;

%Fp — (área foliar específica) razão de massa folhas de ponteiros representativo e massa total do ponteiro representativo, adimensional;

MFVp – massa fresca de folhas verdes da parcela, g;

AFm – área foliar medida no ponteiro representativo, m²; e

MFPm – massa fresca total ponteiro representativo, g.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Dados meteorológicos

Os dados do período durante o qual foi conduzido o experimento dentro da casa de vegetação (22/09/2015 a 08/07/2016), podem ser observados na Figura 20. Verifica-se que o mês de fevereiro de 2016 teve a maior temperatura média do ar com um valor de 28,22°C e junho de 2016 a mínima da série com valor de 18,17°C; a radiação oscilou entre um valor máximo de 12,94 MJ m² em outubro de 2015 e um mínimo de 6,31 MJ m² no mês de maio de 2016; para a umidade relativa do ar a ocorrência do máximo coincide com o mesmo mês de junho de 2016 durante o qual se observou 82,13% e o mínimo no 25 de setembro de 2016 com 53,48 %. Confirmou-se assim a classificação climática da região segundo a classificação de Camargo, como um clima tropical subúmido com um inverno seco (TR-SBi), mais especificamente como um clima úmido subtropical com inverno seco e verão quente (Cwa), segundo a classificação de Köpen, com a temperatura do mês mais quente superior aos 22°C (Alvares *et al.*, 2013; Rolim e Aparecido, 2016).

Figura 20. Médias mensais da Temp, temperatura do ar (°C); Rg, radiação solar global (MJ m²); e UR, umidade relativa do ar (%) no interior da casa de vegetação durante o período de setembro 2015 até junho 2016.

Embora Bakker (1999) sugira que nos sub-trópicos as variações de temperatura possam ser um fator limitante para o desenvolvimento para a cana-de-açúcar, a localização do experimento encontra-se geograficamente perto da região ótima para o cultivo da cana-de-açúcar, segundo Glasziou *et al.* (1965) estes autores sugerem que os maiores valores de concentração de sacarose no caldo de cana se obtêm aos 18° latitudes norte e sul. A temperatura é um fator primário que afeta a taxa de desenvolvimento da planta. Esta exerce uma série de efeitos na morfologia da cana-de-açúcar (comprimento do internódio, altura da planta, comprimento da raiz, formação da parte aérea) e no padrão de crescimento. Assim, baixas temperaturas podem inibir a exportação de sacarose das folhas para o colmo; além disso, reduz-se fortemente o número de internódios; entretanto, as altas temperaturas diminuem o comprimento dos internódios, impactando negativamente no crescimento (Ebrahim, M. K. et al., 1998; Ebrahim, M.

K. H. et al., 1998; Hatfield e Prueger, 2015; Jain et al., 2007). De acordo com a literatura, a cana-de-açúcar pode crescer desde os 15°C até os 45°C, estando a faixa ideal de temperatura entre os 26 e 35 °C (Bacchi e Sousa, 1977; Bakker, 1999; Bonnett, Hewitt e Glassop, 2006; Dinardo-Miranda, Vasconcellos e Landell, 2008; Ebrahim, M. K. *et al.*, 1998; Ebrahim, M. K. H. *et al.*, 1998; Glasziou *et al.*, 1965; Hartt, 1965; Inman-Bamber, 1994; Liu, Kingston e Bull, 1998; Mehareb, Salem e Ghonema, 2017; Moore e Botha, 2014; Samui, Gracy e Kulkarni, 2003).

Analisando a variação da temperatura durante o período do experimento (Figura 21), observa-se que os valores extremos de temperatura média oscilaram de 11,65 °C aos 265 DAP (13 de junho de 2016) a 30,84°C aos 25 DAP (17 de novembro de 2015); a temperatura mínima diária oscilou entre 2,75 °C aos 266 DAP (14 de junho de 2016) e 23,92°C a 59 DAP (20 de novembro de 2015) com uma média para o período de 19,12°C. Por sua vez, a temperatura máxima variou entre 20,52°C e 45,45°C, aos 252 DAP (31 de maio de 2016) e 25 DAP (31 de outubro de 2015) respectivamente, resultando em uma média de 35,31 °C. De modo geral, durante o período experimental, a temperatura média manteve-se na faixa ideal de temperatura, saindo desta a partir do final do mês de abril do ano 2016 (219 DAP) e até o final do experimento, quando a temperatura média se manteve abaixo da temperatura ideal para a cana-de-açúcar. Portanto, obteve-se uma variação média entre as temperaturas máximas e mínimas de 16,18 °C. Ocorreram valores extremos no começo de experimento com uma diferença mínima de 5,09 °C aos 41 DAP (2 de novembro) e com uma diferença máxima de 27,38 °C aos 3 DAP (25 de setembro) ambos no ano 2015.

Figura 21. Variação das temperaturas médias diárias; temperatura máxima do ar (°C); temperatura mínima do ar (°C), temperatura média do ar (°C), linha de temperatura inferior ótima do ar (°C) e linha de temperatura superior ótima do ar (°C) segundo literatura; no interior da casa de vegetação durante o período de setembro 2015 até junho 2016

Por sua vez, a umidade relativa média do ar durante o período foi de 76 % (Figura 22), alcançando uma máxima de 97,40 % (aos 113 DAP) e uma mínima de 53,48 % (aos 3 DAP). A cana-de-açúcar requer uma umidade relativa bastante alta para um crescimento adequado. A umidade relativa do ar intervém na resposta estomática e à diferença de pressão de vapor de ar na folha; assim, a umidade relativa tem uma relação direta com a produtividade da água da cultura, podendo aumentar esta última quando ocorrem valores altos de umidade. A umidade tem mais efeito no florescimento da cana-de-açúcar: a umidade é crítica para indução, iniciação, tempo de emergência de floração e sementes; baixa umidade durante o período de iniciação reduz a floração da cana (Grandt e Meinzer,

1990; Mehareb, Salem e Ghonema, 2017; Olivier, Francois C e Singels, 2015; Samui, Gracy e Kulkarni, 2003). Assim sendo, Samui; Gracy e Kulkarni (2003) sugerem que os valores de umidade relativa para um ótimo rendimento está na faixa entre os 35 e 45 %; desta forma, entretanto valores de umidade superior a 80% tem efeitos negativos sob o rendimento.

Figura 22. Umidade relativa máxima, mínima e média do ar em %, no interior da casa de vegetação, durante o período de setembro 2015 até junho 2016.

A radiação solar é um fator importante para o rendimento e a qualidade potencial da cultura, existindo uma relação linear entre a radiação interceptada cumulativa e a acumulação de biomassa, sendo considerada a radiação interceptada como a fonte para a produção de biomassa (Antwerpen, Van *et al.*, 2013; Kaffka e Grantz, 2014; Moore e Botha, 2014; Muchow *et al.*, 1994; Singels *et al.*, 2005; Singels e Smit, 2009). A conversão da radiação solar incidente em biomassa depende da idade da cultura e das condições de crescimento, sendo mais importante na fase de perfilhamento da cana-de-açúcar (Olivier, Francois C. e Singels, 2015b; Robertson, Wood e Muchow, 1996). A radiação incidente nas folhas tem dois papéis importantes na planta: por um lado, é usada na fotossíntese para produzir sacarose, impulsionando o acúmulo de biomassa e sacarose com o desenvolvimento da folha; à medida que cresce intercepta quantidades crescentes de radiação para produzir sacarose que, por sua vez, é translocada para vários sumidouros na planta. Por outro lado, é significativo seu efeito na abertura estomática, por meio do calor gerado dentro da folha, estabelecendo assim a força motriz da transpiração, mantendo a transpiração proporcional à radiação líquida (Moore e Botha, 2014).

De modo geral o valor médio de radiação solar global (Mg) registrado durante o período experimental foi de $9,9 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ (Figura 23), apresentando extremos de $16,99$ e $1,47 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ aos 39 e 252 DAP respectivamente; a partir do 218 DAP os valores de R_g estiveram abaixo dos $10,20 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$.

Figura 23. Radiação global ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); no interior da casa de vegetação, durante o período de setembro 2015 até junho 2016.

4.2. Consumo de água

Em quanto a demanda hídrica, analisando os dados dos volumes de irrigação acumulados em litros por tratamento (Figura 24A e 24B), pode-se observar que a diferenciação de consumo da água entre os tratamentos inicia aos 101 DAP, o tratamento 50N-150Si manteve-se a maior parte do experimento com um volume de irrigação acima dos demais tratamentos, seguidos pelos tratamentos 50N-50Si, 100N-100Si e 100Si.

Figura 24. Irrigação total acumulada (litro) nos diferentes tratamentos 25N50Si a 100N-50Si (A) e 150N000Si a 100Si (B) durante o período do experimental.

Segundo Steduto *et al.* (2012), em condições de sequeiro a demanda hídrica da cana-de-açúcar pode variar entre 800 a 2000 mm, sugerindo a irrigação em uma produção comercial quando a precipitação anual do local seja menor de 800 mm. A cana-de-açúcar com irrigação plena usando gotejamento em condições controladas, casa de vegetação, a demanda hídrica pode ser reduzida como reportam Barbosa (2015) e Santos (2016), determinaram para 8 variedades o consumo hídrico entre 575 a 1063,4, com média de 819,2 litros. No caso da variedade RB92579, Silva *et al.* (2015) obtiveram em condições de campo uma demanda que varia dependendo do ciclo de 467 mm (357 dias) a 585 mm (406 dias); Contudo, Coelho *et al.* (2012) reportam em Piracicaba sob condições controladas, com irrigação plena por gotejamento, uma consumo de 761,7 mm para um período de 325 dias. No presente estudo como pode-se observar na Figura 25, os dados finais do volume total de irrigação aplicado em litros e o consumo hídrico por tratamento (estimado considerando a área da parcela de aproximadamente $1,04 \text{ m}^2 \text{ parcela}^{-1}$), estiveram um pouco abaixo destas faixas de consumo, obtivendo-se um volume médio de 705,27 litros (674,90 mm), com diferença entre os tratamentos de maior e menor 263,29 litros (251,96 mm). A ordem decrescente de consumo destes foi: 50N150Si > 50N50Si > 100N100Si > 100Si > 100N50Si > 100N150Si > 150N150Si > 25N50Si > 150N100Si > 50N100Si > 25N150Si > 150N50Si > 100N > 25N100Si.

Figura 25. 3Volume total de irrigação aplicado (litros) e valor estimado de lâmina total consumida (mm), da cana-de-açúcar RB92579, submetida em diferentes doses de nitrogênio e silício.

4.3. Variáveis biométricas da cana-de-açúcar

4.3.1. Diâmetro, altura e volume do colmo

A pesar de ter tomado medidas contra o tombamento da cana-de-açúcar este pode ter influenciado nos resultados, segundo Silva *et al.* (2012) este é um fator que afeta a dinâmica da morfologia da cana-de-açúcar. Assim, as baixas variações nas variáveis estudadas em análise de crescimento (Tabela 9), observa-se que não houve diferença significativa, quando compara-se os tratamentos.

Tabela 9. Resumo da análise de variância com os valores calculados de F para as variáveis de Diâmetro do colmo (mm), Altura (m), Volume (cm³) da cana-de-açúcar RB92579, submetida em diferentes doses de nitrogênio e silicato.

Fonte de variação	Diâmetro do colmo (mm)	Altura (m)	Volume (cm ³)
	Valores de F (Pr > F)		
Bloco	1,79ns	6,37**	6,29**
Nitrogênio (N)	0,99ns	1,1ns	1,94ns
Silício (Si)	0,26ns	1,56ns	0,68ns
N x Si	1,75ns	0,77ns	1,44ns
CV (%)	5,66	6,79	11,88
Média geral	22,09	2,95	1183,24

Nível de significância de 1% (**); nível de significância de 5% (*); não significativo (ns); Coeficiente de Variação (CV).

Estes resultados corroboram os obtidos por Medeiros *et al.* (2009), Chaves *et al.* (2013) e Clemente *et al.* (2017); onde a aplicação de emendas e silicatos, na cana-de-açúcar, não teve influência significativa nas variáveis biométricas como, altura de planta e diâmetro de colmos.

Os valores médios obtidos de diâmetro do colmo foram de 22,09 mm (Tabela 9). Os resultados obtidos aproximam-se daqueles encontrados em uma análise comparativa entre 25 famílias de cana-de-açúcar sob condições de déficit hídrico de Silva *et al.* (2008) que reportam um valor médio de 20 mm; para a variedade RB92579 Gonçalves (2008), Silva (2015), Oliveira (2008), Costa *et al.* (2011) e Oliveira *et al.* (2010) reportaram valores médios de 21,30

mm, 22,50 mm, 23,00 mm, 23,30 mm e 23,70 mm respectivamente. Valores similares foram reportados por Alamilla-Magaña *et al.* (2016) com 23,70 mm com a variedade MEX69290 irrigada no México. Porém os valores foram menores aos obtidos por Dhanapal *et al.* (2018) na Índia com a variedade Co86032 irrigada por superfície de 27,83 mm, e de Barbosa *et al.* (2015) que reportaram 26,30 mm para a variedade RB867515; em cana soca Aquino *et al.* (2017) e Uribe *et al.* (2013) obtêm 25 mm de diâmetro, para as variedades SP801816 e SP803280, respectivamente; valor similar foi obtido por Silva *et al.* (2012) com a variedade RB92579.

Não obstante, vários autores asseveram que o uso de emendas aumenta os valores do diâmetro colmo, assim Clemente *et al.* (2017) usando a RB92579 com aplicações de gesso obtêm um valor de 29,50 mm; entretanto Chaves *et al.* (2013) para a variedade SP791011 com uma aplicação de 300 kg ha⁻¹ de silício com AGROSSILICIO PLUS mediram 28,69 mm. Costa *et al.* (2011) afirmam que o diâmetro do colmo é a que apresenta menor variação, pois essa variável depende das características genéticas da planta.

Em relação à valor médio da altura da planta foi de 2,95 m (Tabela 9), estes resultados foram semelhantes aos obtidos por Aquino *et al.* (2017) para a soca da variedade SP801816, em sequeiro na região sudeste com 3,00m; para a soca da variedade RB92579, no nordeste condições de sequeiro Costa *et al.* (2011) reportaram 2,75 m. Por outro lados, os resultados foram superior aos encontrados em condições de estresse hídrico por Silva *et al.* (2008) em 80 variedades de 1,93 m e em 12 famílias por Silva *et al.* (2008) com 2,00 m, por sua vez Uribe *et al.* (2013) no sudeste, reportou na soca da variedade SP803280, irrigada com aplicação de 70 kg ha⁻¹ de nitrogênio, uma altura de 1,78m; Chaves *et al.* (2013) no nordeste usando a variedade SP791011 irrigada plenamente com aplicação de 600 kg ha⁻¹ de silício, obteve valores de 1,32 m. Já para a variedade RB92579 Silva (2015) em sequeiro no nordeste aos 270 dias obtêm uma altura de 1,80 m. Entretanto vários autores reportam valores superiores aos 3,00 m para a variedade RB92579 irrigada, assim Oliveira (2008), Oliveira *et al.* (2010) e Silva *et al.* (2012), reportaram alturas de 3,40 m, 3,11 m e 4,00 m respectivamente na região nordeste. Nesta região Clemente *et al.* (2017), usando emendas de gesso para a mesma variedade em cana planta observaram uma altura de 2,90 m. Em geral os valores de altura para a variedade RB92579, dependendo das condições de manejo podem variar entre 1,80 m e 4,00 m, neste estudo os resultados encontram-se dentro desta faixa de valores. O volume total do colmo por ser uma variável derivada das duas supramencionadas sua média foi de 1183,24 cm³.

4.3.2. Área foliar (AF)

Os efeitos dos fatores de N e Si, apresentaram diferença significativa pelo teste F ($p>0,05$) (Tabela 10). Os resultados obtidos de AF apresentaram uma média de 3,48 m² (Tabela 10), sendo estes valores conflitantes, pois em alguns estudos estão em torno de 2,17m² a 3,31 m² como reportado por Marques e Silva (2008) em três variedades de cana-de-açúcar. Assim como Oliveira *et al.* (2007) em três variedades aos 377 DAP com variações entre 3,6 m² e 5,1 m². Maia Júnior *et al.* (2018) avaliaram as características morfológicas e produtivas e suas correlações em seis cultivares, onde determinaram para a variedade RB92579 um área foliar aproximada de 4,5 m² aos 240 DAP. Porém superior aos determinados em oito variedades por Santos, (2016) encontrou valores da ordem de 0,81 e 4,23 m².

Na literatura os valores de IAF para a variedade RB92579 oscilam entre 2,54 m² m⁻² e 5,55 m² m⁻², dependendo das condições de manejo. Segundo Oliveira *et al.* (2013), está variedade destaca por sua área foliar, estes autores constataram em um estudo conduzido no litoral do Pernambuco com onze clones RB e sete variedades comerciais, que a RB92579 destaca por sua maior área foliar. Igualmente Santos (2015) analisando a produtividade de dez genótipos RB de cana-de-açúcar (RB92579, RB99395, RB98710, RB91514, RB961003, RB991552, RB991536,

RB99383, RB9364 e RB99386), na safra 2012/2013 em Alagoas, observou valores de IAF de 2,54 m²m² em cana-planta para a RB92579. Carmo *et al.* (2010) estudaram a variedade RB92579, irrigada por sulcos, obtêm um valor de IAF pouco superior a 3,5. Ferreira Junior *et al.* (2012) observaram um IAF máximo de 3,84 para a RB92579. Do mesmo modo, Almeida *et al.* (2008) em cana-planta, comparada com outras três cultivares a RB92579 alcançou valores superiores de IAF com valores acima dos 4 aos 320 DAP. Vinicius *et al.* (2017) dentre quatro cultivares que estudaram o maior IAF na variedade RB92579 com 4,46. Oliveira *et al.* (2014) observaram a maior IAF comparativamente ao da SP791011, com valor médio de 5,04. Silva (2007) encontrou na análise de sete variedades em ciclo de cana-planta, a RB92579 esteve em os cultivares com maiores valores de IAF com 5,05 aos 360 DAP. Apesar disso, Costa *et al.* (2011) observaram dentre quatro variedades de cana-de-açúcar a variedade RB92579 ficou com os menores IAF no período da colheita com 2,7.

Tabela 10. Resumo da análise de variância com os valores calculados de F para a variável área foliar (AF, m²) da cana-de-açúcar RB92579, submetida em diferentes doses de nitrogênio e silicato.

Fonte de variação	AF (m ²)
	Valores de F (Pr > F)
Bloco	5,47**
Nitrogênio (N)	6,11**
Silício (Si)	8,84**
N x Si	2,35ns
CV (%)	21,26
Média geral	3,48

Nível de significância de 1% (**); nível de significância de 5% (*); não significativo (ns); Coeficiente de Variação (CV).

Dentre os fatores responsáveis pelo maior IAF da RB92579, os autores sugerem que apesar de que está variedade possui folhas mais curtas, mas o número de plantas por metro quadrado excede as demais variedades, possui elevadas taxas de crescimento do IAF no início do cultivo, ressaltando pela maior interceptação de luz acumulada no ciclo, refletindo em área foliar aproximadamente 24% maior que a média das demais, obtendo a maior fotossíntese bruta (Ferreira Junior *et al.*, 2012; Oliveira, M. W. de *et al.*, 2014; Vinicius *et al.*, 2017).

As folhas interceptam os raios solares e contém os pigmentos fotossintéticos que convertem a energia solar em energia química, a qual será usada para realizar a fotossíntese. Neste sentido, o desenvolvimento da área foliar (AF), ou seja, a estrutura ativa fotossintética, está diretamente correlacionada a capacidade de fotoassimilação e a produção de biomassa (Costa et al., 2011; Oliveira, R. C. de *et al.*, 2016). O estudo da AF pode ser correlacionado com o nível de maturação e o rendimento da cana-de-açúcar, assim em conjunto com outras variáveis biométricas permite determinar o potencial produtivo das variedades de cana-de-açúcar (Moura, 2016; Oliveira *et al.*, 2007). Assim Maia Júnior *et al.* (2018) sugerem que a AF e a largura foliar são características biométricas que podem ser utilizadas na seleção de cultivares promissoras de cana-de-açúcar, por terem fortes correlações com a produção de colmos. Outra variável biométrica dependente da AF, é o chamado índice de área foliar (IAF), que representa uma medida adimensional da AF, através da relação entre a AF (m²) com a área do solo coberta por esta (m²).

Outro fator que pode explicar os maiores valores de IAF pode ser a resposta desta variedade ao estresse hídrico, porque a área foliar reduz em situações de déficit hídrico motivado pela diminuição da interceptação da radiação solar, o que leva à queda da transpiração e da fotossíntese, além de senescência foliar precoce (Pereira, 2015). Nesta lógica, Oliveira *et al.* (2016) determinaram as respostas em termos de área foliar de cana-de-açúcar à reposição de água, determinaram uma resposta linear, com um aumento de 13,96 cm² para cada intervalo de 25% de reposição hídrica. Consequentemente Batista (2013) observou valores de IAF, em dois variedades de cana-de-açúcar com e sem irrigação, obtendo um efeito positivo da irrigação sob o IAF dependendo da variedade podendo chegar

até 70% de aumento. Silva *et al.* (2012) no ciclo de cana soca, para a variedade RB92579 irrigada observaram um IAF máximo de 5,55 aos 332 DAC.

Com relação ao ajuste do comportamento da variável resposta área foliar em função do incremento das doses de silício. Constatou-se que, em geral obteve-se um incremento nos valores da AF, com aumentos na dose de Si, encontrando-se o modelo polinomial quadrático como o melhor em ajustar-se ao desempenho desta variável, apresentando-se incrementos na característica avaliada no fator silício, onde obteve-se a máxima média com 4,64 m² para o tratamento 100N150Si. Com relação às dosagens de N, apesar dos maiores valores serem obtidos no tratamento 100N, houve um destaque do nível 50N, exibindo o melhor ajuste ao modelo polinomial quadrático (Figura 26).

Figura 26. Valores médios da área foliar (AF, m²) em função das doses de nitrogênio para cada nível de silício. *Significativo (P<0,05).

Chaves *et al.* (2013) indicam que o afeito das doses de silício foi significativamente influenciado na AF. Neste sentido, Sobral *et al.* (2011) que conseguiram aumentos significativos da AF, quando o solo foi tratado com escória siderúrgica, com um incremento de 8% na AF para uma variação de 4 Mg ha⁻¹ de escória siderúrgica. Ao contrário de Bastos (2008b) quem verificou que para a maior dosagem de escoria siderúrgica dentro da dose de 600 mg dm⁻³ de N foi a que apresentou a menor AF.

4.3.3. Biomassa fresca da parte aérea

Nos resultados da análise de variância para variáveis de biomassa fresca da parte aérea (Tabela 11), observa-se que não houve diferença significativa pelo teste F (p<0,05) para todas as variáveis (IMPF, BNHAF, FOLF, PONTF, BFC, BIOMF) no fator Si e interação. O fator N, exceto para IMPF houve diferença significativa (p<0,05) para todas as variáveis. Em média das massas fresca dos perfilhos improdutivos (IMPF) foi de 487, 48g, das bainhas (BNHAF) 670,31g, das folhas (FOLF) 1185,03g, dos ponteiros (PONTF) 1709,73g, dos colmos (BFC) 15084,39g e da biomassa fresca total aérea (BIOMF) 19136,94g.

Tabela 11. Resumo da análise de variância para as variáveis de biomassa fresca, g.

Fonte de variação	IMPF	BNHAF	FOLF	PONTF	BFC	BIOMF
	Valores de F (Pr > F)					
Bloco	1,96ns	5,66*	5,82*	7,27**	6,85**	7,24**
Nitrogênio (N)	2,1ns	7,13**	5,18*	3,07*	8,71**	12,27**
Silício (Si)	0,3ns	0,13ns	1,12ns	1,02ns	2,44ns	2,79ns
N x Si	0,96ns	2,12ns	2,25ns	0,82ns	2,5ns	3,57ns
CV (%)	32,81	17,00	15,14	16,42	6,28	5,05
Média geral	487,48	670,31	1185,03	1709,73	15084,39	19136,94

Massas (g) fresca dos perfilhos improdutivos (IMPF), Massas (g) fresca das bainhas (BNHAF), Massas (g) fresca das folhas (FOLF) Massas (g) fresca dos ponteiros (PONTF), Massas (g) fresca dos colmos (BFC), biomassa (g) fresca total aérea (BIOMF). Nível de significância de 1% (**); nível de significância de 5% (*); não significativo (ns); Coeficiente de Variação (CV).

4.3.3.1. Massa fresca de bainhas (BNHAF)

Em relação a comparação das médias da massa fresca de bainhas (BNHAF) por meio do teste de F ($p < 0,05$) em relação aos fatores N e Si expostos na Tabela 11, observou-se diferença significativa, para os níveis de N. Considerando este fator, os maiores valores foram encontrados no tratamento 150N tanto para os níveis 100Si quanto 150Si, com um valor médio de 858,70 g. Entretanto, verificou-se comportamento polinomial quadrático, ressaltando o tratamento 50N ($P < 0,05$), onde apresentam-se o melhor ajuste ao modelo, com um valor médio máximo de 569,85g.

Figura 27. Massa fresca de bainhas (g) em função das doses de nitrogênio cada nível de silício. *Significativo ($P < 0,05$).

4.3.3.2. Massa fresca das folhas (FOLF)

No tocante à análise das diferenças das médias pelo teste de F ($p < 0,05$) para a massa fresca das folhas (FOLF) apresentadas na Tabela 11, o fator N apresentou diferenças significativas. Na Figura 28, mostra-se o ajuste da massa fresca das folhas (g) para o fator N para todos os níveis de Si, onde pode-se observar que o modelo polinomial quadrático apresentou o melhor ajuste, destacando o nível 50N, para os níveis 50Si e 150Si, no primeiro

deles encontra-se o maior valor médio 1408,40g de folhas para a interação 50N50Si; quanto a tendência observando-se dentro do nível 150N um marcado efeito positivo do Si, ao invés no nível 50N onde este tem um efeito negativo.

Figura 28. Massa fresca de folhas (g) em função das doses de nitrogênio cada nível de silício. *Significativo ($P < 0,05$).

4.3.3.3. Massa fresca de ponteiros (PONTF)

Embora para o teste de F o nitrogênio foi significativo ($p < 0,05$) para a massa fresca de ponteiros (PONTF) (Tabela 11). Realizada a análise gráfica de correlação (Figura 29) nesta observa-se que não houve tanto para o fator N, ocorrendo os maiores valores médios de PONTF no nível 50N, com um máximo para a interação 50N50Si de 2046,12g.

Figura 29. Massa fresca de ponteiros (g) em função das doses de nitrogênio cada nível de silício. *Significativo ($P < 0,05$).

4.3.3.4. Biomassa Fresca dos Colmos (BFC)

O desdobramento da Biomassa Fresca dos Colmos (BFC) estão apresentados na Tabela 11, o N apresentou diferenças significativas para o teste de F ($p < 0,05$), como mostra-se na Figura 30, destaca o nível 100N, desta forma o maior valor médio obteve-se para a interação 100N100Si com 16757,45 g. Neste caso, assim como na variável anterior o modelo polinomial quadrático não apresentou significância estatística.

Figura 30. Massa fresca de colmos, BFC, (g) em função das doses de nitrogênio cada nível de silício. *Significativo ($P < 0,05$).

4.3.3.5. Biomassa fresca da parte aérea (BIOMF)

Em quanto a Biomassa fresca da parte aérea (BIOMF), o resultado da análise de regressão apresentado na Figura 31; observa-se que o fator N mostrou ajuste ao modelo polinomial quadrático nas dosagens de 50N, com relação aos valores máximos médios foram encontrados para o nível 100N, estando o maior na interação 100N100Si com um valor de 20788,05 g. O Si teve um efeito positivo nos níveis 50N e 150N, nos outros níveis foi negativo, ressaltando 100N.

Figura 31. Biomassa fresca total da parte área, (g) em função das doses de nitrogênio cada nível de silício. *Significativo (P<0,05).

4.3.4. Biomassa seca da parte área (BIOM)

Nos resultados da análise para as variáveis de biomassa seca da parte área (Tabela 12), observa-se que exceto para massa seca dos colmos (BSC), não houve diferença significativa pelo teste F ($p < 0,05$) para as outras das variáveis (IMPS, BNHAS, FOLS, PONTs, BIOMs) quando se comparam com os tratamentos. Em média a massas seca dos perfilhos improdutivo (IMPS) foi de 300,79g, das bainhas (BNHAS) 440,21g, das folhas (FOLS) 872,15g, dos ponteiros (PONTs) 607,09g, dos colmos (BSC) 3812,29g e da biomassa seca total aérea (BIOM) 6032,53g.

Tabela 12. Resumo da análise de variância para as variáveis de biomassa seca.

Fonte de variação	IMPS	BNHAS	FOLS	PONTs	BSC	BIOM
	Valores de F (Pr > F)					
Bloco	0,86ns	0,67ns	2,3ns	7,9**	3,21*	1,76ns
Nitrogênio (N)	2,26ns	1,15ns	2,54ns	1,76ns	3,44*	3,71ns
Silício (Si)	0,43ns	0,27ns	0,31ns	0,83ns	1,44ns	0,59ns
N x Si	0,58ns	1,91ns	1,09ns	1,01ns	0,6ns	0,94ns
CV (%)	28,97	12,36	9,66	17,31	8,41	6,40
Média geral	300,79	440,21	872,15	607,09	3812,29	6032,53

Massas seca dos perfilhos improdutivo (IMPS), Massas seca das bainhas (BNHAS), Massas seca das folhas (FOLS), Massas seca dos ponteiros (PONTs), massa seca dos colmos (BSC), biomassa seca total aérea (BIOM). Nível de significância de 1% (**); nível de significância de 5% (*); não significativo (ns); Coeficiente de Variação (CV).

Apesar de que para o teste de F o nitrogênio foi significativo ($p < 0,05$) para a variável BSC, quando realizado a análise de regressão foi encontrado o comportamento desta variável não se ajusta ao modelo polinomial quadrático quando analisado o fator N, o maior valor médio encontra-se na interação 100N100Si com um valor médio de 4103,45 g.

Figura 32. Variabilidade da massa seca de colmos, BSC (g) em função das doses de nitrogênio cada nível de silício. *Significativo ($P < 0,05$).

4.4. Variáveis da análise tecnológica da cana-de-açúcar

As características tecnológicas do caldo extraído da cana-de-açúcar são relevantes para a produção de etanol ou açúcar (Oliveira, A. R. de et al., 2016). Os resultados das variáveis de qualidade tecnológica da cana apresentaram as seguintes características: °Brix (16,43), Pol (11,49%), Pureza (69,70%), Fibra (10,63%), ARcana (Açúcares redutores da cana) (1,08%), ATR (Açúcar total recuperável) (104,69 kg Mg⁻¹), RBA (Rendimento bruto de açúcar) (15,07 Mg ha⁻¹), e umidade do colmo (74,67%) (Tabela 18). Neste estudo, as baixas variações das características tecnológicas da cana-de-açúcar, resultado que não houve diferença significativa entre os tratamentos. Neste sentido, Oliveira *et al.* (2012) sugerem que algumas variedades têm comportamento distinto com relação ao nitrogênio, sendo capazes de utilizar mais do que outras, como também em relação ao acúmulo de sacarose; ou seja, altas doses podem não afetar a qualidade dos caldos, desta forma, Galdino *et al.* (2013) evidenciam que em sequeiro os diferentes níveis de adubação nitrogenada não alteraram a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar para a variedade RB92579, de outra forma Sobral *et al.* (2011) registram que as doses crescentes de escória de aciaria não proporcionaram aumento significativo nas variáveis industriais da cana-de-açúcar. Silva (2014) utilizando a variedade RB 855156, determinou que a interação entre doses de N e uso de escória ou calcário não afeta a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. Assim Prado e Pancelli (2006) afirmam que normalmente a ausência de efeitos significativos em estudos da qualidade industrial da cana, deve-se, ao fato de que os tratamentos não afetaram o rendimento de colmos.

Tabela 13. Resumo da análise de variância para as variáveis de qualidade da cana.

Fonte de variação	Brix	Pol	Pureza	Fibra	AR _{cana}	ATR	RBA	Umidade
Bloco	2,66ns	0,36ns	1,2ns	1,38ns	1,07ns	0,31ns	1,74ns	3,33*
Nitrogênio (N)	1,56ns	0,93ns	0,86ns	0,16ns	0,76ns	1,1ns	1,71ns	0,71ns
Silício (Si)	0,16ns	0,13ns	0,31ns	1,94ns	0,16ns	0,26ns	1,75ns	0,5ns
N x Si	1,91ns	1,18ns	1,07ns	0,53ns	1,07ns	1,31ns	0,21ns	1,05ns
Média geral	16,43	11,49	69,70	10,63	1,08	104,69	15,07	74,67
CV (%)	8,07	14,84	7,67	8,30	15,01	11,97	12,45	1,85

Brix do caldo (Brix - °Brix); Pol do caldo (POL - %); Pureza aparente do caldo (Pureza - %); Fibra da cana-de-açúcar (Fibra - %);

Açúcares redutores da cana (AR_{cana} - %); Açúcar total recuperável (ATR - kg Mg⁻¹) Umidade do colmo (Umidade - %); Rendimento bruto de açúcar (RBA - Mg ha⁻¹); ns: não significativo, nível de significância de 1%(**); nível de significância de 5%(*) Coeficiente de variação (CV).

4.4.1. Sólidos solúveis do caldo ou °Brix do caldo (B)

O valor médio do teor de sólidos solúveis do caldo foi de 16,43 °Brix, (Tabela 18), porém a média dos valores estiveram menores aos 18,0°Brix recomendados ideais para a indústria (Fernandes, 2011) e do rango de 18,21°Brix a 21,9°Brix obtidos em estudos com a variedade RB92579 (Costa *et al.*, 2011; Dellabiglia, 2016; França *et al.*, 2013; Oliveira, 2008; Oliveira, E. C. A. de *et al.*, 2011; Oliveira *et al.*, 2013; Pereira *et al.*, 2017; Silva, T. G. F. da *et al.*, 2014; Simões *et al.*, 2015), estão coerentes com Fernandes (2011) quem sugere que para a região centro-sul do Brasil a faixa de variação entre os meses de maio a novembro é de 15°Brix a 20°Brix, sendo coerentes com os valores achados nesta variedade por Moura (2016) para o final das avaliações em São Paulo, mês de julho de 2015, com valor de 16,02 °Brix; assim como com os valores achados em estudos em casa de vegetação de um conjunto de variedades submetidas a diferentes lâminas de irrigação em na região de Piracicaba (Barbosa, 2015; Leal, 2012; Santos, 2016; Uribe *et al.*, 2013). Assim como Korndörfer (2010) neste experimento o Si não influenciou o Brix% cana.

4.4.2. Porcentagem em massa de sacarose aparente do caldo ou Pol do caldo (S)

Em relação com o teor de sacarose aparente do caldo (Pol) é uma variável que representa a porcentagem aparente de sacarose contida na solução de açúcares, sendo portanto a variável diretamente ligada com o nível de maturação da cana (Barbosa, 2015; Fernandes, 2011). E segundo Oliveira *et al.* (2016) guarda uma relação direta com o estresse hídrico da planta, o seja, torna-se maior com o aumento do estresse hídrico da planta. O valor médio obtidos para Pol% foi de 11,49% (Tabela 18), foram abaixo de 14% recomendados por Ripoli e Ripoli (2005) e da faixa reportada por vários estudos em diversas condições com a variedade RB92579 de 13,55% a 18,90% (Costa *et al.*, 2011; Dellabiglia, 2016; França *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2017, 2013; Oliveira, 2008; Oliveira, E. C. A. de *et al.*, 2011; Oliveira, T. B. A. *et al.*, 2011; Pereira *et al.*, 2017; Santiago *et al.*, 2014; Silva, T. G. F. da *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2017; Simões *et al.*, 2015). Porem resultados similares também foram encontrados por Moura (2016) na variedade RB92579 para o mês de julho de 2015, com um valor de 11,53 %; assim como Barbosa (2015) quando este estudo 8 variedades de cana-de-açúcar, submetidas a quatro condições de disponibilidade hídrica em ambiente protegido com 11,39%, por Maschio, (2011) em 24 variedades de cana-de-açúcar, submetidas à irrigação plena e ao déficit hídrico com valores médios de 12,35%, e por Cardozo (2012) para 8 variedades entre os meses de abril a junho para safra de 2003 com médias de 9,34% a 12,92% respectivamente. Embora Korndörfer (2010) observou um aumento significativo da Pol% caldo com o uso de adubação silicatada, obtendo maiores valores nas parcelas que receberam Si com uma média de 19,21% em comparação às que não receberam com 18,70%; neste experimento o Si não teve efeito na Pol% do caldo.

4.4.3. Pureza aparente do caldo (Q, %)

A pureza do caldo da cana-de-açúcar está diretamente relacionada com o teor de sacarose aparente do caldo (Pol) e com o teor de sólidos solúveis do caldo (Brix), sendo uma variável relacionada com a qualidade da matéria-prima para a indústria, e pode sofrer influência das impurezas minerais e vegetais no momento da colheita (Costa et al., 2011; Oliveira et al., 2012). De acordo com Ripoli e Ripoli (2005) os valores de pureza devem ser superiores a 85%, entretanto Fernandes (2011) sugere que no início da safra ela pode apresentar um valor mínimo de 80%. O valor médio encontrado neste estudo foi de 69,70% (Tabela 18) abaixo dos recomendados, porém dentro da faixa de valores achados por outros autores. Barbosa (2015) encontrou valores semelhantes em 8 variedades com 71,3%, e por Cardozo (2012) no início da safra de 2003.

Trabalhos com a variedade RB92579 reportaram valores entre 64,57% a 90,2% (Costa et al., 2011; França et al., 2013; Maschio, 2011; Moura, 2016; Oliveira et al., 2017, 2013; Pereira et al., 2017; Santiago et al., 2014; Silva, T. G. F. da et al., 2014; Simões et al., 2015). Entretanto Korndörfer (2010) estudo o efeito do silício na pureza do caldo, apresentando que o silício não interferiu na pureza do caldo, sendo a média para 16 cultivares de plantas sem Si de 87,90%, enquanto nas plantas com Si o valor foi de 88,16%.

4.4.4. Fibra da cana-de-açúcar (F, %)

A fibra representa a matéria insolúvel em água contida na cana-de-açúcar, na atualidade, essa variável tem ganhado destaque nas pesquisas e sua caracterização química (cinzas) e energética (poder calorífico) é tem papel fundamental na indústria canavieira, seja pela geração de energia, com a queima da biomassa, podendo ser utilizada nos processos industriais e a sua vez gerar excedentes que são vendidos as companhias energéticas; ou pela produção de etanol de segunda geração (Barbosa, 2015; Costa et al., 2011; Fernandes, 2011). O teor de fibra da cana limpa e bem despontada, na região centro-sul do Brasil, oscila entre 9% e 14%, com a maioria dos resultados na faixa de 10% a 12% (Fernandes, 2011). No entanto, Ripoli e Ripoli (2005) recomendam que os valores da fibra devem estar entre 11% e 13%.

No entanto, os resultados do valor médio do teor de fibra ficaram abaixo dos reportados por vários autores com 10,63% (Tabela 18), porém dentro da faixa sugerida pelo Fernandes (2011). Sendo semelhantes aos achados por Oliveira et al. (2014) estudaram a produção e qualidade das variedades RB867515, RB92579 e SP791011, cultivadas em Minas Gerais, acharam para variedade RB92579 com um valor médio de 10,91%; Barbosa (2015) com um valor médio de 10,03% e, Cardozo (2012) para o início da safra de 2003 (março e maio) com médias de 8,98 e 10,46% respectivamente. Assim como, Santos (2016) com oito variedade de cana-de-açúcar, submetidas a diferentes condições de disponibilidade hídrica em ambiente protegido obteve valores médios para a cana-planta e cana-soca iguais a 9,88% e 11,57%, respectivamente. Apesar de neste experimento o silício não teve um efeito no teor de fibra, contrastando com Korndörfer (2010) que para 16 cultivares de cana-de-açúcar observou que, os tratamentos que receberam silício apresentaram um valor superior (11,56%) ao tratamento sem silício (10,83%).

Segundo Tavares; Amaral (2014) estes baixos valores médios de fibra na variedades “RB” podem ser explicados pelo fato de as “RB” serem mais eficientes já em seu melhoramento genético para a alta produção de caldo/ATR, reduzindo consequentemente o teor final de fibras. Diversos trabalhos desenvolvidos com a variedade

RB92579, concluem que dependendo do manejo e da duração do ciclo os valores de teores de fibra variaram de 8,5% a 16,6%, assim, Costa *et al.* (2011) avaliando o crescimento e a produtividade das variedades de cana-de-açúcar RB92579, SP791011, RB931530 e RB93509, realizado em Alagoas, obtiveram que a variedade RB92579 agrupou-se com as variedades com os menores teores de fibra com um valor de 14,43%. Maschio (2011) analisando o comportamento de 24 variedades á diferentes lâminas de irrigação reporta valores médios de fibra para esta variedade de 8,5%. Por sua vez, Oliveira *et al.* (2013) obtiveram resultados entre os valores antes citados quando estudaram os componentes de produção e a existência de variabilidade genética em clones RB e variedades comerciais em cana-planta no Litoral da Mata Norte de Pernambuco, das dezoito variedades avaliadas eles acharam que a variedade RB92579, agrupou-se dentro das que apresentaram maior conteúdo de fibra com 13,02%.

A quantidade de palha também interfere com a percentagem de fibra, bem como Santiago *et al.* (2014) observaram nesta variedade que o teor de fibra variou entre 12,95% e 13,34% aumentando conforme a diminuição da palhada. O nitrogênio pode diminuir o conteúdo de fibra, como foi estudado por Dellabiglia (2016) estudando o sinergismo entre a adubação nitrogenada e das bactérias diazotróficas fixadoras de nitrogênio atmosférico na cana-de-açúcar no irrigada e irrigada por gotejamento subsuperficial, obtém para fibra os maiores valores para os tratamentos sem irrigação com uma média de 12,85%, diminuindo com o incremento do nitrogênio de 13,32% (0 Kg ha⁻¹ N) a 12,83% (210 Kg ha⁻¹ N). o impacto da disponibilidade hídrica causa uma diminuição nos teores de fibra, isso pode ser explicado pelo fato de que com o aumento da disponibilidade hídrica para as plantas, há maior quantidade de caldo (Oliveira, A. R. de et al., 2016). De esta forma, Oliveira *et al.* (2011) avaliaram a produtividade e a eficiência de uso da água em onze variedades de cana-de-açúcar cinco de maturação precoce e seis de maturação média à tardia, submetidas ao regime de sequeiro e à irrigação plena, acharam que o teor de fibra na variedade RB92579 diminui com a disponibilidade de água variando de 15% em sequeiro para 13,1% irrigado. Pereira *et al.* (2017) em um estudo dos índices tecnológicos e de produtividade durante a fase de maturação das variedades RB92579, RB98710, RB99395 e RB961003 irrigadas em Alagoas, obtiveram , que o teor de fibra das variedades foi em média 13,1%, sendo de 12,8% para a RB92579. Oliveira *et al.* (2016) examinaram quatro níveis de reposição hídrica nas variedades RB961003, RB943206; RB72454; RB012018; VAT 90-212; RB012046 e RB92579, entre as variedades que apresentam um decréscimo na porcentagem de fibra com o aumento das lâminas de irrigação a RB92579, variou de 16% (40%ETc) para 14,30% (100%ETc). Simões *et al.* (2015) determinaram a influência de três sistemas de irrigação sobre as trocas gasosas e as qualidades tecnológicas da variedade RB 92579, por três ciclos consecutivos, cultivada em Petrolina, acharam um aumento dos teores de fibra ao longo dos ciclos variando de 13,8% em cana planta para 14,9% na primeira soca e 16,6 % na segunda soca. Silva *et al.* (2014) observaram um aumento com o ciclo da cultura, desse modo ao final do ciclo da soca a fibra variou de 13,74% para 16,26% na soca e ressocas respectivamente; apesar disso, Oliveira *et al.* (2017), apreciaram pouca variação entre a cana-planta e a primeira soca, com valores de 14,30% e 14,74% respectivamente. Em um estudo da produtividade agrícola e o desempenho industrial de clones RB de cana-de-açúcar, França *et al.* (2013) nas safras 2010/2011, 2011/2012 e 2012/2013, em Pernambuco, obtiveram para a RB92579 um teor de fibra de 13,64%.

4.4.5. Açúcares Redutores da Cana (ARcana, %)

Açúcares redutores da cana (ARcana, %) são produtos precursores de cor no processo industrial, isto é, participam de reações que aumentam a cor do açúcar, depreciando a qualidade do produto. O AR acompanha a maturação da cana-de-açúcar podendo ser usado para avaliar o nível de maturação da cana-de-açúcar, dessa forma, a medida que o teor de sacarose se eleva os açúcares redutores decrescem de quase 2% para valores abaixo de 0,5%

entre março e abril e setembro e outubro no Hemisfério Sul, podendo chegar a valores de 0,2% (Fernandes, 2011). Por seu lado, Ripoli e Ripoli (2005) recomendam que os valores de AR devem ser inferiores a 0,8%. Pereira *et al.* (2017) sugere que em clones de RB os valores adequados para a industrialização podem variar entre 1,5% no início da safra a 1% no decorrer da safra. Os valores reportados em diversos estudos, com diferentes condições de manejo para a variedade RB92579, mencionam como valor médio para os açúcares redutores da cana é de 0,69%, com pouca variação de 0,66 a 0,74% (Maschio, 2011; Oliveira, A. R. de *et al.*, 2016; Pereira *et al.*, 2017; Santiago *et al.*, 2014; Silva, T. G. F. da *et al.*, 2014; Simões *et al.*, 2015). Não obstante, os resultados reportados na literatura, a média dos valores do AR resultou em 1,08% (Tabela 18), sendo superior ao recomendado por Ripoli e Ripoli (2005) valores semelhantes foram achados por Barbosa (2015) com uma média para o teor de AR em oito variedades com diferentes regimes hídricos de 1,08%. Neste experimento o silício não teve efeito nos teores de AR, coincidindo com os achados por Korndörfer (2010) que em 16 cultivares não reportou efeito da aplicação do silício nos teores de AR, registrando valores de 0,54 e 0,53, sem e com aplicação de silício, respectivamente.

4.4.6. Açúcar Total Recuperável (ATR, kg Mg⁻¹)

Por sua vez, os açúcares redutores totais (ATR) são os indicadores que representam a quantidade total de açúcares da cana (sacarose, glicose e frutose), das características da qualidade industrial da cana-de-açúcar, o ATR é o mais importante tanto para indústria quanto para os produtores sendo usado para determinar o pagamento destes últimos, relaciona a quantidade de açúcar (kg) produzido por cada tonelada de matéria-prima processada pela indústria (Costa *et al.*, 2011; Fernandes, 2011; Oliveira, A. R. de *et al.*, 2016).

Os resultados em este experimento foram menores aos antes referidos com 104,69 kg Mg⁻¹ (Tabela 18), este valor ainda está aquém dos 130,50 kg Mg⁻¹ reportados na safra 2015/2016 para a região Centro-Sul, no entanto, assemelham os valores de 104,40 kg Mg⁻¹ para o início da mesma safra no mês de março (UNICA, 2017), semelhantes aos encontrados por Moura (2016) quem na região de Bauru, São Paulo, observou valores de 97,49 e 116,17, para os meses de junho e julho do 2015 respectivamente; assim como Barbosa (2015) estudando 8 variedades submetidas a quatro condições de reposição hídrica em casa de vegetação com um valor médio de ATR de 104,73 kg Mg⁻¹; porém Cardoso (2012) reporta valores menores para o início da safra de 2003 (março e abril) com médias de 78 kg Mg⁻¹ e 93,2 kg Mg⁻¹ respectivamente.

A variedade RB92579 quando destaca-se quando comparada com outras variedades obtendo os maiores valores de Açúcar total recuperável (ATR), oscilando na faixa de 129,6 kg Mg⁻¹ a 147,98 kg Mg⁻¹ (Costa *et al.*, 2011; França *et al.*, 2013; Maschio, 2011; Oliveira *et al.*, 2017; Pereira *et al.*, 2017). A época de corte pode influenciar os valores de ATR para esta variedade assim, Moura (2016) quando avaliaram a maturação no período março-julho do 2015, constatou um incremento do valor médio de 70,04 (mês de março) aumentando a 116,17 ao final da safra (mês de julho); dessa forma, Oliveira *et al.* (2011) na safra do ano 2010 observaram que a época de corte influenciou nas variáveis de industrialização, aumentando o valor médio de 131,96 kg Mg⁻¹ (mês de agosto) até 136,59 kg Mg⁻¹ (mês de outubro). Oliveira *et al.* (2017) mencionam um aumento do ATR com o decorrer do ciclo da cultura passando de 141,64 kg Mg⁻¹ na cana-planta para 147,98 kg Mg⁻¹ na primeira soca, Entretanto segundo Oliveira *et al.* (2011) a lâmina de irrigação exercem um efeito positivo aumentando de 146,8 kg Mg⁻¹ em sequeiro para 158,9 kg Mg⁻¹ à irrigação plena. Outro fator que influencia no ATR é a adubação neste sentido Oliveira, (2008) destaca que com um manejo adequado da adubação o ATR nesta variedade pode atingir valores de 159,97 kg Mg⁻¹. Porém um incremento nos níveis de nitrogênio pode causar uma diminuição no ATR, desta forma Dellabiglia (2016) relata em sequeiro uma

diminuição de 97,25% nos valores de ATR variando de 163,20 kg Mg⁻¹(0 kg ha⁻¹ N) para 158,72 kg Mg⁻¹ (210 kg ha⁻¹ N); a irrigação amortece um pouco este efeito obtendo uma redução de 89,81% diminuindo 162,52 kg Mg⁻¹ a 145,97 kg Mg⁻¹, para 0 e 210 Kg ha⁻¹ N, respectivamente. No entanto, segundo Korndörfer (2010) o silício não tem efeito sob os açúcares totais recuperáveis (ATR), apresentando uma média para 16 cultivares de 158,84 e 160,88 kg·Mg⁻¹ para ATR sem e com aplicação de silício, respectivamente.

4.4.7. Rendimento Bruto de Açúcar (RBA, Mg ha⁻¹)

O rendimento médio de açúcar (RBA) encontrado neste estudo foi de 15,07 Mg ha⁻¹ (Tabela 18). Estes resultados são similares aos encontrados em outros estudos com a variedade RB92579, porem o RBA varia em resposta ao manejo e a duração do ciclo da cultura, assim Silva *et al.* (2014) obtiveram uma média para cana soca e ressoça de 17,75 Mg ha⁻¹, diminuindo com o ciclo de 20,89 Mg ha⁻¹ na soca para 14,61 Mg ha⁻¹ na ressoça. Oliveira *et al.* (2017) obtém uma média entre cana-planta e primeira soca de 17,92 Mg ha⁻¹. Costa *et al.* (2011) analisando o quatro variedades de cana-de-açúcar observaram que no quarto ciclo de cultivo a variedade RB92579 destacou-se dentro delas com valores médios de 13,40 Mg ha⁻¹. Resultados menores foram observados por França *et al.* (2013) estudando o desempenho de quatorze clones RB, reportaram para a variedade RB92579 uma média para três safras de 9,60 Mg ha⁻¹. Ao contrário de Oliveira *et al.* (2014), no ciclo de cana-planta conseguem valores maiores dentre três variedades com uma média de 19,00 Mg ha⁻¹. A irrigação tem um efeito positivo incrementando os valores de RBA nesta variedade, Maschio, (2011) achou um rendimento médio de açúcar para irrigação plena de 26,0 Mg ha⁻¹, desse modo, Oliveira (2008) e Oliveira *et al.* (2011) relatam a irrigação comparada com sequeiro gera ganhos de 29 Mg ha⁻¹, apresentando um incremento de 213%, passando de 13,6 Mg ha⁻¹ em sequeiro para 42,6 Mg ha⁻¹.

4.4.8. Umidade do colmo (Umidade, %)

A porcentagem de água contida na cana é definida tecnologicamente como umidade % cana, embora não seja usualmente considerada na rotina do setor sucroalcooleiro, está diretamente ligada com o rendimento da indústria, principalmente nos gastos com logística e transporte da matéria-prima do campo até a indústria, apesar desta importância existem poucos estudos sobre a dinâmica do conteúdo de água nos colmos da cana-de-açúcar (Barbosa, 2015; Cardozo, 2012). Fernandes (2011) afirma que durante o período de safra na região centro-sul do Brasil, as médias diárias de umidade de cana decrescem normalmente de 72% a 68%, do início para o final da safra, sendo a média da safra em torno de 70%. Quando estiver fora dessa faixa pode significar que a cana está entrando em estresse hídrico ou pode ter sido colhida fora do ponto de maturação ideal. O resultado de umidade média do colmo foi de 74,69% (Tabela 18); estes valores foram maiores aos sugeridos Fernandes (2011) e aos achados por Simões *et al.* (2015) que, trabalhando com a variedade RB92579 por três ciclos consecutivos em Petrolina, sob diferentes métodos de irrigação, indicam que a umidade descesse com o ciclo da cultura, assim obtiveram a maior umidade no ciclo de cana-planta, com um valor médio de 69,9%, decrescendo um 4,3%, até o último ciclo onde foi de 66,9%. Não obstante, o resultado obtivo neste experimento assemelha-se ao obtido por Moura (2016) com 75,70% para o mês de julho do 2015, com Barbosa (2015) em oito variedades irrigadas por gotejamento e conduzidas em casa de vegetação, em Piracicaba, com um valor médio de 75,67%, e Cardozo (2012), que, na safra de 2003, trabalhando na mesma localidade na safra de 2003, para oito variedades, observou um valor médio máximo de 80% para o início da safra (março 2003), diminuindo com o decorrer da safra até um mínimo de 68,09% ao termino desta.

Contudo, de forma geral nota-se que os maiores valores de umidade e os menores de Brix, Pol e ARcana, sugerem que provavelmente baixo as condições de manejo este material apresentou um ciclo mais prolongado, assim a cultura ainda estava em fase de crescimento, podendo indicar que foi colida fora de seu melhor nível de maturação, neste caso se a colheita fosse realizada em uma data posterior as variáveis da qualidade industrial da cana-de-açúcar poderiam chegar a valores mais elevados. Porém, a irrigação e nitrogênio, poderiam ter influenciado nestes resultados, assim Oliveira *et al.* (2012) constataram que os níveis de adubação interferiram na qualidade do caldo, sendo que o nitrogênio favorece o prolongamento do período vegetativo da cana, e a disponibilidade de água segundo Oliveira *et al.* (2016) guarda uma relação negativa com as variáveis de qualidade industrial, dessa forma, cultivares de cana-de-açúcar quando cultivadas sob condições de estresse hídrico (baixa disponibilidade de água) apresentam características tecnológicas do caldo, que atendem aos padrões estabelecidos e aceitáveis pela indústria.

4.5. Índices relacionados com a produção da cana-de-açúcar

Nos resultados da análise de variância para índices relacionados com a produção (Tabela 14), observa-se que houve diferença significativa a um nível de 5% de probabilidade comparando-se os tratamentos para os índices de índice de clorofila Falker (ICF) e a produtividade de colmos por hectare (TCH), no primer índice com interação com o silício e o segundo com o nitrogênio.

Tabela 14. Resumo da análise de variância para as para índices relacionados com a produção.

Fonte de variação	ICF	ICa	TCH
	Valores de F (Pr > F)		
Bloco	17,58**	1,06ns	6,85**
Nitrogênio (N)	0,56ns	0,77ns	8,71*
Silício (Si)	3,46*	1,42ns	2,44ns
N x Si	1,02ns	0,79ns	2,5ns
Média geral	30,26	0,26	144,39
CV (%)	15,12	10,20	6,28

Índice de colheita com base na biomassa seca da parte aérea (IC-A); Índice de clorofila FALKER (ICF); produtividade de colmos por hectare (TCH - Mg ha⁻¹), nível de significância de 1%(**); nível de significância de 5%(*); não significativo (ns); Coeficiente de Variação (CV, %).

4.5.1. Índice de clorofila Falker (ICF)

Segundo Barbieri (2012) o clorofilômetro é um instrumento que aferem, de forma indireta e não destrutiva os teores de clorofila com base nas propriedades óticas das folhas. O clorofilômetro chamado ClorofiLOG (Falker Automação Agrícola, Brasil), utiliza fotodiodos emissores em três comprimentos de onda, a partir desses dados, o aparelho fornece valores chamados Índice de Clorofila Falker (ICF) proporcionais à absorbância das clorofilas. Estes autores para um experimento com *Cynodon spp.* cv. ‘Tifton 85’ acharam que os teores de clorofila total se relacionaram diretamente com os valores do ICF com coeficiente de determinação (r²) acima de 0,88. Resultados similares foram obtidos por Rigon *et al.* (2012) comparando os teores de clorofila usando o método clássico (extração com dimetilsulfóxido) e os valores do ICF em folhas de mamoneira (*Ricinus communis* L.), alcançando uma relação linear com um coeficiente de determinação (r²) de 0,85. Schlichting *et al.* (2015) constaram a eficiência do ClorofiLOG (Falker ClorofiLOG® 1030) ao comparar lhe com o clorofilômetro SPAD (Minolta SPAD®502) na cultura de trigo, determinaram que os aparelhos não apresentam diferença entre se na determinação indireta da clorofila nas plantas de trigo, porem o ICF foi estatisticamente igual ao teor de clorofila

determinado no laboratório. O índice de clorofila pode-se relacionar com outras variáveis da cana-de-açúcar, assim Moura (2016) estudando a maturação das variedades RB855156 e a RB92579, entre março e julho de 2015, recomenda que o índice de SPAD pode ser utilizado para estimar, por meio de regressões múltiplas, as características tecnológicas de qualidade da cana-de-açúcar durante a maturação. No entanto, Bonow *et al.* (2012) determinaram em 30 genótipos de cana-de-açúcar, que o índice de clorofila (medido por meio de um clorofilômetro portátil OptiSciences® CCM-200), não tem relação com a produtividade dos colmos. Igualmente Batista (2013) avaliou o índice de clorofila com o auxílio de um clorofilômetro digital, (SOIL CONTROL, CFL-1030), em duas variedades de cana-de-açúcar, RB867515 e RB855536, sob diferentes regimes hídricos (irrigado e sequeiro), achando que apesar as plantas em sequeiro comparadas com as irrigadas apresentaram valores do índice de clorofila inferior, este parâmetro não é suficiente para distinguir as variedades em função do regime hídrico.

A média dos resultados do ICF para todos os tratamentos foi 30,26 (Tabela 14), este valor acha-se abaixo da faixa de valores observados pelo Batista (2013) que conseguiu valores médios variaram de 33,6 a 45,1; Gonçalves *et al.* (2010) sugerem que a variedade RB92579 apresenta baixos valores de eficiência fotoquímica, quando foi comparada com outras três variedades SP79-1011, RB72454 e RB98710; cultivadas em casa de vegetação, sugerindo que pode ser uma característica própria do genótipo. Porém, os resultados são similares aos medidos por Barbosa *et al.* (2010), que avaliaram o ICF para as variedades RB867515 e SP89-1115, submetidas a dois níveis de irrigação (plena e parcial) em ambiente protegido, acharam que os valores médios variaram de 40,0 a 60,0 ao longo do ciclo da cultura; e aos obtidos por Barbosa, (2015) que, avaliou o ICF para em oito variedades irrigadas por gotejamento e conduzidas em casa de vegetação, em Piracicaba, com um valor médio aos 365 DAP de 33,1. Da mesma maneira, Dellabiglia (2016) na variedade RB92579 cultivada em dois ambientes de produção (irrigado e não irrigado), obtém para o índice de SPAD valores médios aos 365 DAP, para o manejo irrigado foi de 32,33, enquanto para sequeiro foi de 30,79.

Quanto aos impactos dos níveis de nitrogênio não representou um efeito estatisticamente significativo (Figura 33). Contudo, Dellabiglia (2016) encontrou que sem a aplicação de irrigação, interação entre as doses de nitrogênio aplicadas e o índice SPAD, ocorrendo aumento deste com o aumento da dose de nitrogênio.

Figura 33. Índice de Clorofila Falker (ICF) em função das doses de nitrogênio cada nível de silício. *Significativo ($P < 0,05$).

Bastos (2008b) quando analisou o impacto da escória siderúrgica e sua interação com a adubação nitrogenada, em cana-de-açúcar variedade SP701011 sob condição de casa de vegetação, concluiu que a presença de Si no material corretivo quando associado à adubação nitrogenada diminuiu a concentração de Si no solo e aumentou o teor de Si na planta. Desta forma, como era esperado o silício teve efeito estatisticamente significativo nos resultados do ICF (Tabela 14). O melhor desempenho foi nas doses de 50Si (Figura 33); contrastando com o sugerido por Korndörfer; Pereira e Camargo (2002a) que o uso do Si na adubação pode aumentar a clorofila das folhas na cana-de-açúcar. Freitas; Fernandes e Maia, (2013) estudaram o efeito da aplicação de silício em plantas de arroz, observaram que o Si além de melhorar a incidência de luz devido a proporcionar as plantas melhorar arquitetura, diminuindo a transpiração, aumentou o conteúdo de clorofila nas folhas, em especial em situação de estresse hídrico para a planta. De modo consequente, Moro (2012) avaliou a relação entre o déficit hídrico e o Si em dois cultivares de arroz, conseguindo que o Si além de aumentar a produtividade, influenciou no conteúdo de clorofila na fase de florescimento do cultivar com menor ciclo. Oliveira *et al.* (2016) observaram efeito positivo de fontes de silício no teor de clorofila nas folhas de sorgo, influenciando no crescimento vegetativo e a capacidade fotossintética das plantas. Na cana-de-açúcar Bezerra (2015) avaliou o efeito combinado do Si e o estresse hídrico nas variedades RB867515 e RB855536, concluindo que o uso do Si demonstrou efeito favorável, tendo proporcionado incremento no índice SPAD, e promovendo maior tolerância às plantas de cana-de-açúcar ao estresse hídrico, modificando tanto variáveis morfológicas quanto fisiológicas.

4.5.2. Índice de colheita com base na biomassa aérea (ICa)

A pesar das altas eficiências de captura e uso da radiação pela cana-de-açúcar, estas não são compensadas por altas eficiências na distribuição de biomassa, o que pode ser traduzido em perdas econômicas, assim uma forma para medir a eficiência de conversão de produtos fotoassimilados em material de importância econômica, é através do índice de colheita (IC), o qual representa um quociente que relaciona o rendimento biológico com uma medida do rendimento econômico (Inman-Bamber, 2013; Kapur et al., 2013; Marafon, 2012).

Índice de colheita com base na biomassa seca da parte aérea (ICa), médio observado para todo período experimental foi igual a 0,26 (Tabela 14); ficando um pouco abaixo dos recomendados nas referências consultadas, porém similares aos obtidos por Thangavelu (2006) com trinta variedades na Índia com valores médios de 0,269; assim como por Barbosa, (2015) e Santos (2016), em experimentos em Piracicaba com 0,270 e 0,266 respectivamente. Segundo Thangavelu (2006) a relação N / Si na balsa aos 6 meses apresenta uma correlação negativa com o IC. O IC é um parâmetro útil para avaliar a adequação de diferentes variedades, podendo ser usado para a seleção de genótipos que melhor traduzem a assimilação em partes econômicas da planta (Kapur et al., 2013). Tendo implicações fundamentais na formulação de modelos de crescimentos de cultura, neste sentido, Steduto *et al.* (2012) utilizaram este índice para estimativa da partição da biomassa total produzida em açúcar no modelo Aquacrop. Considerado na cana-de-açúcar como a massa de sacarose por unidade de biomassa acima do solo, Doorenbos e Kassam (1979) sugerem que pode oscilar de 0,2 a 0,3. Segundo Inman-Bamber (2013) para cultivares comerciais de cana-de-açúcar de alto rendimento pode-se esperar que esteja entre 0,3 e 0,4; pelo que Steduto *et al.* (2012) considera que o IC pode variar em torno de 35%.

4.5.3. Produtividade de colmos por hectare (TCH, Mg ha⁻¹)

A variável produtividade de colmos por hectare (TCH) ou produtividade agrícola, refere-se à relação entre os pesos dos colmos (Megagrama) pela área colhida (hectare), indicando o rendimento agrícola da cana-de-açúcar em biomassa. Neste caso, como foi descrito na metodologia, a estimativa do TCH foi considerando a área ocupada por cada parcela e a área disponível para o dossel das plantas; para dessa forma extrapolar esses valores para uma área de um hectare. Assim o valor médio obtido no experimento foi de 144,39 Mg ha⁻¹ (Tabela 14), um valor superior comparado a média de 77 Mg ha⁻¹ reportados para a região Centro-Sul na safra 2016/2017 (UNICA, 2017); a variedade RB92579, tem um alto potencial produtivo bem como foi determinado por Duarte *et al.* (2017) que, entre 21 variedades pesquisadas durante a safra 2012/2013, obtiveram que a RB92579 esteve entre os cultivares que apresentaram os maiores TCH com 89,56 Mg ha⁻¹. Oliveira *et al.* (2013) que estudaram a variabilidade genética em clones RB e variedades comerciais em cana-planta no Pernambuco, reportaram que a variedade RB92579 exibiu os maiores valores, com um valor médio de TCH de 140,00 Mg ha⁻¹. Assim como Almeida *et al.*, (2008), avaliaram os padrões de crescimento com os graus-dias e disponibilidade hídrica em vários cultivares RB, determinaram que durante as estações de cultivo (cana-planta e cana-soca) a variedades RB92579 tem atributos de crescimento e produção superiores às demais tanto na cana-planta como na soca com valores de TCH de 167,89 Mg ha⁻¹ e 136,22 Mg ha⁻¹ respectivamente.

Porém tem estudos que registram valores menores, assim França (2013) durante as safras 2010/2011, 2011/2012 e 2012/2013 onde a variedade RB92579 foi a que apresentou a maior média de TCH com um valor de 69 Mg ha⁻¹. Segundo Santos (2015) a produtividade da variedade RB92579 é pressionada pela disponibilidade hídrica, dessa forma reportou valores médios em dois ciclos de 77,1 Mg ha⁻¹, atribuindo a baixa produtividade ao efeito da menor precipitação ocorrida nos dois ciclos indicando que a deficiência hídrica na brotação e estabelecimento, fases em que a cultura é mais sensível influenciou para obter menor produtividade da cana. Por conseguinte, Batista (2013) estudou a deficiência hídrica nas variedades RB855536 e RB867515, obteve para ambas variedades um aumento da produtividade superior a 81% quando comparado a irrigação contra o sequeiro, com um acréscimo máximo de produtividade de 122 Mg ha⁻¹. Para a variedade RB92579, Oliveira (2011) obtiveram acréscimos superiores a 1,80 vezes no TCH quando comparada o sequeiro com a irrigação plena, passando de 90,1 Mg ha⁻¹ no sequeiro para 255,6 Mg ha⁻¹ para irrigação plena. Tendo em conta, que nas condições do experimento a cultura foi conduzida em regime de irrigação plena, não houve limitações hídricas na fase de crescimento promovendo um desenvolvimento adequado da cultura, dessa forma, pode ser explicado os valores elevados de TCH achados nesta pesquisa.

As análises de variância revelaram o efeito significativo do nitrogênio (N) ($p < 0,05$) na TCH (Tabela 14). Segundo Shigaki *et al.* (2016) a variedades RB 92579, quando comparada com outras variedades RB, apresenta maior acúmulo de N nos colmos, reportando valores médios de TCH de 111 Mg ha⁻¹.

No entanto, o efeito do N eventualmente é reportado na literatura como um fator que impacta na TCH, como Rosa *et al.* (2015) sugerem que a cana-de-açúcar responde diferentemente aos tratamentos com N, nem sempre a maior taxa de N resulta em maior produtividade, portanto, pode ser problemático a quantificação da resposta da cultura ao N. Dentro do fator N, o nível 100N apresentou o melhor desempenho, na interação 100N100Si onde foram obtidos os maiores valores médios de TCH 160,40 Mg ha⁻¹ (Figura 34).

Figura 34. Produtividade de colmos por hectare (TCH, Mg ha⁻¹) em função das doses de silício cada nível de nitrogênio.
*Significativo ($P < 0,05$).

Neste contexto, Galdino *et al.* (2013) determinaram que a produção de biomassa de colmos não foi afetada pela adubação nitrogenada e não apresentou diferenças significativas entre as variedades avaliadas no primeiro ciclo. Assim Muchovej e Newman (2004) observaram que o rendimento de colmos na cana-planta e da primeira soca não foi significativamente afetado pela taxa de fertilizantes nitrogenados, sendo que taxas de fertilizantes nitrogenados superiores a 170 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ não aumentaram a produtividade da cana-de-açúcar. Por outro lado, pesquisas indicam que o efeito do N pode ser influenciado pela idade da cultura e a disponibilidade hídrica no solo; neste sentido Vitti *et al.* (2007) estudaram o efeito residual da adubação nitrogenada em duas socas consecutivas (2^a e 3^a), concluindo que a fertilização nitrogenada em doses crescentes até 175 kg ha⁻¹ resulta em aumento linear na produtividade de colmos de uma 2^a soca; esse efeito se estende para a 3^a soca. Wiedenfeld (1995) determinou que a relação entre o nível de irrigação e a taxa de aplicação de N ocorreram principalmente nas culturas da soca quando ocorreram respostas à aplicação de N, reportando que as respostas à aplicação de N foram maiores no nível de irrigação alta e não foram tão pronunciadas no nível mais baixo de irrigação, indicando que se a água é limitante, a cana-de-açúcar não pode aproveitar a disponibilidade aumentada de N. Assim Andrade Júnior *et al.* (2012) obtiveram os maiores valores de TCH (média de 150,5 Mg ha⁻¹), a medida que aumentaram a aplicação de N, com aumentos na disponibilidade de água no solo.

4.6. Produtividade da água da cana-de-açúcar

Os valores médios apresentados na Tabela 15 para a Produtividade da Água para Açúcar (PAA), Produtividade da Água para Biomassa (PAB), e Produtividade da Água em Energia total da parte área (PAE), encontrados para o experimento foram de 2,24 kg m⁻³, 8,57 kg m⁻³ e 192,03 MJ m⁻³, respectivamente. Os resultados mostram que os fatores N e Si não afetaram a PAA, sendo influenciada apenas pelo fatorial NxSi. Entretanto as variáveis PAB e PAE, foram influenciadas pelos fatores N e Si, verificando-se diferenças significativas inclusive com interação destas variáveis com o fatorial NxSi ($p < 0,01$).

Tabela 15. Resumo da análise de variância para as variáveis Produtividade da Água para Açúcar (PAA, kg m⁻³), Produtividade da Água para Biomassa (PAB, kg m⁻³), e Produtividade da Água em Energia total da parte área (PAE, MJ m⁻³), da cana-de-açúcar RB92579, submetida em diferentes doses de nitrogênio e silício.

Fonte de variação	PAA	PAB	PAE
	Valores de F (Pr > F)		
Bloco	1,6ns	1,65ns	2,05ns
Nitrogênio (N)	2,04ns	7,35**	6,49**
Silício (Si)	2,62ns	8,94**	8,21**
N x Si	3,59*	7,71**	7,72**
Média geral	2,24	8,57	192,03
CV (%)	12,60	6,26	6,64

Nível de significância de 1% (**); nível de significância de 5% (*); não significativo (ns); Coeficiente de Variação (CV, %).

4.6.1. Produtividade da água para açúcar (PAA, kg m⁻³)

O valor médio de produtividade da água para açúcar (PAA) encontrado neste estudo foi igual a 2,24 kg m⁻³ (Tabela 15), que pode ser considerado alto quando se compara com os valores sugeridos pela FAO (2018) que para boas condições de cultura a PAA deve oscilar entre 0,6 kg m⁻³ a 1 kg m⁻³; e a valores reportados por outros autores entre estes Silva *et al.* (2011) estudaram um sistema de produção da variedade RB92579, cana soca irrigada, observaram uma produtividade da água para açúcar de 0,69 kg m⁻³. Barbosa, (2015), que para oito variedades submetidas a diferentes lâminas de irrigação apresenta PAA variando de 1,24 kg m⁻³ a 1,71 kg m⁻³, Santos (2016) encontrou valores médios de 1,53 kg m⁻³. Não obstante, Leal (2012) utilizando o rendimento bruto de açúcar, apresenta valores de PAA sob irrigação plena variando de 1,97 kg m⁻³ a 2,78 kg m⁻³. Leal *et al.* (2017) avaliaram a produtividade da água para rendimento bruto de açúcar para um conjunto de variedades plantadas em dois solos sometidas a diferentes tratamentos de irrigação, observando para a variedade RB 92579 valores médios de 2,12 kg m⁻³. Entretanto Coelho *et al.* (2012) estudando quatorze variedades de cana-de-açúcar sob irrigação plena, em solos franco-arenoso, acharam que a variedade RB92579 é a mais eficiente, com uma PAA de 3,52 kg m⁻³.

Analizando a Figura 35, os resultados mostram que para os níveis do fator o Si, nas doses 50%Si e 100%Si, foi observada ajuste ao modelo polinomial quadrático; dentro do nível de 100%Si a combinação 50%N-100%Si obtiveram-se os maiores valores.

Figura 35. Variabilidade da Produtividade da Água para Açúcar (PAA, kg m^{-3}), para as diferentes combinações de nitrogênio e silício.

Analisando os dados de Açúcar Total Recuperável (ATR), apresentados anteriormente, observou-se que os maiores valores são achados para esta combinação (50%N-100%Si) com $116,70 \text{ kg Mg}^{-1}$, podendo ser responsável pelos valores superiores na PAA. Porém apesar desta variável não apresentar diferenças significativas com os tratamentos, assim como ressaltou Korndörfer (2010) que, embora os valores de ATR não tenham sido significativamente afetados pela aplicação de silício, constata-se uma tendência de maior ATR em plantas com aplicação do Si, recomendando que seria interessante aprofundar os estudos para melhor conhecer a influência do silício nos parâmetros tecnológicos.

4.6.2. Produtividade da água para biomassa aérea (PAB, kg m^{-3})

Em quanto a produtividade da água para biomassa aérea (PAB), o valor médio em todo período experimental foi igual a $8,57 \text{ kg m}^{-3}$ (Tabela 15), valores próximos aos sugeridos pela FAO (2018) que estabelece que a PAB para cana-de-açúcar em boas condições estão no rango de 5 a 8 kg m^{-3} . Singh, Sidana e Kumar (2018) observaram valores de $8,17 \text{ kg m}^{-3}$, para cana-de-açúcar em campo no estado de Punjab na Índia. Sendo superior aos encontrados por Singh, Shukla e Bhatnagar (2007) em estudos de campo em solos franco arenosos ao norte da Índia obtiveram uma média de produtividade em cana-planta de $7,1 \text{ kg m}^{-3}$, diminuindo para $6,3 \text{ kg m}^{-3}$ para cana-soca. Barbosa (2015) quando estudava os efeitos de diferentes intensidades de déficit hídrico sobre a maturação de 8 cultivares, observou valores médios de $5,29 \text{ kg m}^{-3}$; Santos (2016) e Barros (2015) estudando o mesmos oitos cultivares em ciclos diferentes (cana-planta e cana-soca) determinaram uma PAB média de $5,71 \text{ kg m}^{-3}$ e $7,28 \text{ kg m}^{-3}$ respectivamente. Farias et al., (2008) em uma pesquisa na região norte-paraibana dos tabuleiros costeiros, cana-de-açúcar irrigada com 80% de água disponível (ou seja, fração de esgotamento de 20%), apresentam que a PA varia de 5 a 8 kg m^{-3} , e com 100% atinge valores médios de $7,22 \text{ Kg m}^{-3}$. No caso da variedade RB92579 Leal (2012) no primer ciclo observou valores de $7,33 \text{ kg m}^{-3}$. Silva *et al.* (2011) estudaram um sistema de produção da variedade RB92579, cana soca irrigada no Vale do São Francisco, observaram uma produtividade da água para colmos $5,36 \text{ kg m}^{-3}$.

De outra forma, Inman-Bamber e Smith (2005) fizeram uma revisão de uma série de publicações, indicando que os valores de produtividade da água podem variar de $8,37 \text{ kg m}^{-3}$ a $20,94 \text{ kg m}^{-3}$; assim Silva (2014) observou valores de PAB nas cultivares IACSP95-5000 e SP79-1011 de $14,2 \text{ kg m}^{-3}$ e $10,8 \text{ kg m}^{-3}$, respectivamente. Maschio (2011) observou para variedade RB92579 cultivada em solo franco-arenosa produtividades em média de $10,10 \text{ kg m}^{-3}$. Leal *et al.* (2017) avaliaram a produtividade da água em biomassa fresca de colmo para 14 variedades em um solo franco-arenoso submetidas a diferentes tratamentos de irrigação, observando para irrigação plena que as não tiveram diferença significativa entre as variedades com valores de $11,97$ a $15,78 \text{ kg m}^{-3}$, onde a variedade RB 92579 atingiu valores de $13,92 \text{ kg m}^{-3}$. Oliveira *et al.* (2011) determinaram que em termos de PA a variedade RB92579 responde a disponibilidade da água, quando mantiveram esta variedade com irrigação plena estes autores observaram que foi mais produtiva com incrementos de 1,32 vezes comparada com sequeiro com valores de $18,3 \text{ kg m}^{-3}$ e $7,89 \text{ kg m}^{-3}$, respectivamente. Coelho *et al.* (2012) estudando a produtividade de água em biomassa de colmo fresco para 24 variedades brasileiras de cana-de-açúcar submetidas a tratamentos de irrigação, observaram um efeito do tipo de solo sob a variação da produtividade dentro do tratamento de irrigação observaram uma variação de $18,05$ a $29,21 \text{ kg m}^{-3}$ no solo argiloso e $17,17$ a $27,14 \text{ kg m}^{-3}$, para as variedades que crescem em solos arenosos; dentre estas últimas a variedade RB92579 destacou-se com uma produtividade da água de $27,14 \text{ kg m}^{-3}$.

Como observa-se na Figura 36 assim como para PAA os maiores valores foram observados para a iteração 25%N100%Si, com uma tendência a diminuir com aumentos dos níveis de nitrogênio. Para doses de 150%Si comparadas com 100%Si, não teve um aumento da PAB, variando em função dos níveis de N, isto pode ser explicado pelo sugerido por Santos (2017) explica que a queda na produção com aumentos das doses de silício, dentre outros fatores pode estar relacionado pelo efeito corretivo do silicato, assim a aplicação de calcário inicial juntamente com elevadas doses dos silicatos, que também apresentam poder corretivo, mesmo sem aumentos drásticos no pH, podem causar algum desbalanço nos micronutrientes que afetam o desenvolvimento e à produção da cana-de-açúcar. Neste sentido, vários estudos confirmam o efeito da aplicação de elevar o pH, promovendo a redução significativa na acidez potencial ($H + Al$) do solo (Carvalho-Pupatto, Büll e Crusciol, 2004; Korndörfer et al., 2010; Mansano *et al.*, 2014; Silva, 2014); e Madeiros, Vieira e Aquino (2009) em um estudo em duas variedades de cana-de-açúcar (RB72454 e SP791011), determinaram que a aplicação de escoria siderúrgica afeta os teores dos micronutrientes manganês (Mn) e o ferro (Fe) nas folhas.

Figura 36. Variabilidade da Produtividade da água para biomassa (PAB, kg m^{-3}), para as diferentes combinações de nitrogênio e silício.

4.6.3. Produtividade da água em energia total da parte área (PAE, MJ m^{-3})

A produtividade da água energia total da parte área (PAE) obtida neste estudo foi estimada tomando como referência as conversões dos componentes da biomassa e açúcar reportados por Vásquez Lizcano (2015). Assim o valor médio para PAE foi de $192,03 \text{ MJ m}^{-3}$ (Tabela 15). Valor superior aos achado por Leal (2012) que analisando 14 variedades plantas em solos franco-arenosa a RB92579 em irrigação plena observou um valor para o primer corte de $105,10 \text{ MJ m}^{-3}$. Maschio (2011) e Coelho *et al.* (2012) estudando a produtividade da água em energia total da parte aérea de diferentes variedades, observou uma variação na PAE na ordem de $101,17$ a $159,54 \text{ MJ m}^{-3}$ para as variedades cultivadas em solo argiloso, e de $110,22$ a $145,45 \text{ MJ m}^{-3}$ para as variedades cultivadas em solo franco-arenoso, dentro estas últimas a variedade RB92579 destacou com valores médios de $145,10 \text{ MJ m}^{-3}$.

Para as condições do experimento foi verificado, pelo teste F ($p < 0,05$), que existiu interação significativa tanto os fatores Nitrogênio (N), Silício (Si), como o fatorial N x Si sob a PAE (Tabela 15).

Quando a análise do desdobramento da interação entre os fatores N e Si para a PAE estão apresentados na Tabela 15, para o teste de Tukey ($p < 0,05$), onde pode-se observar que como para PAA e PAB houve diferença estatística para as doses de nitrogênio, assim como na PAB o Si teve diferença significativa e em todos suas doses, desta forma o melhor ajuste ao modelo polinomial quadrático da PAE são obtidos como no casos da PAA e PAB para a dosagem 50%Si e 100Si, dentro deste tratamento pode-se observar na Figura 37 que os valores atingem um máximo da PAE como na PAB para o tratamento 25%N100%Si, com uma tendência a diminuir com aumentos no níveis de N.

Figura 37. Variabilidade da Produtividade da água em energia total da parte área (PAE, MJ m^{-3}), para as diferentes combinações de nitrogênio e silício.

5. CONCLUSÕES

Os tratamentos de doses de nitrogênio e silício não tiveram influência significativa nas variáveis biométricas como, altura de planta e diâmetro de colmos. No caso da área foliar, a cana respondeu positivamente nas doses de silício ($525 \text{ kg de Si ha}^{-1}$); o efeito do nitrogênio foi observado só para a dose $60 \text{ kg de N ha}^{-1}$; assim o valor máximo foi observado na interação ($60 \text{ kg de N ha}^{-1} 525 \text{ kg de Si ha}^{-1}$).

Como era esperado, o silício afetou no Índice de Clorofila Falker (ICF), sendo o melhor desempenho alcançado nas doses de $175 \text{ kg de Si ha}^{-1}$, sendo o valor médio máximo para a interação $60 \text{ kg de N ha}^{-1} 175 \text{ kg de Si ha}^{-1}$.

A interação dos fatores nitrogênio e silício não apresentaram efeitos significativos sob as variáveis da qualidade tecnológica da cana-de-açúcar.

O nitrogênio resultou em um efeito positivo sob a Produtividade de colmos por hectare (TCH, Mg ha^{-1}), a dose $60 \text{ kg de N ha}^{-1}$ foi a que apresentou o melhor desempenho; a interação com os maiores valores de TCH corresponde a $60 \text{ kg de N ha}^{-1} 350 \text{ kg de Si ha}^{-1}$.

A produtividade da água para açúcar (PAA, kg m^{-3}), assim como a produtividade da água para biomassa (PAB, kg m^{-3}) e a produtividade da água em energia total da parte área (PAE, MJ m^{-3}), foram influenciadas pelos baixos níveis de nitrogênio, apresentado diferenças significativas nas doses 15 e $30 \text{ kg de N ha}^{-1}$. No caso da PAA o efeito do silício foi observado só na dose de $350 \text{ kg de Si ha}^{-1}$; assim, a interação que apresentou os maiores valores médios foi o $30 \text{ kg de N ha}^{-1} 350 \text{ kg de Si ha}^{-1}$. Já para PAB e PAE, o silício apresentou efeito em todas as dosagens, constituindo-se como positivo na dose $350 \text{ kg de Si ha}^{-1}$ e para PAB negativos na dose $525 \text{ kg de Si ha}^{-1}$, resultando os valores médios máximos em ambas (PAB e PAE) na interação $15 \text{ kg de N ha}^{-1} 350 \text{ kg de Si ha}^{-1}$.

Baseado nas respostas da produtividade da água achados neste estudo, conclui-se que o silício pode levar a um uso mais eficiente da água.

REFERÊNCIAS

- ALAMILLA-MAGAÑA, J. C. *et al.* Soil moisture tension effect on sugar cane growth and yield. **Agricultural Water Management**, v. 177, p. 264–273, 1 nov. 2016.
- ALI, M. H.; TALUKDER, M. S. U. Increasing water productivity in crop production—A synthesis. **Agricultural Water Management**, v. 95, n. 11, p. 1201–1213, 1 nov. 2008.
- ALMEIDA, A. C. DOS S. *et al.* Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 5, p. 1441–1448, out. 2008.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.
- AMARASINGHE, U. A.; SMAKHTIN, V. Water productivity and water footprint: misguided concepts or useful tools in water management and policy? **Water International**, v. 39, n. 7, p. 1000–1017, 10 nov. 2014.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S. DE *et al.* Níveis de água, nitrogênio e potássio por gotejamento subsuperficial em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 1, p. 76–84, jan. 2012.
- ANDRADE, M. G. DE *et al.* Statistical quality control for the evaluation of the uniformity of microsprinkler irrigation with photovoltaic solar energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, n. December 2016, p. 743–753, 2017.
- ANTWERPEN, R. VAN *et al.* Sugarcane as an Energy Crop: Its Role in Biomass Economy. In: BHARAT P. SINGH (Ed.). **Biofuel Crop Sustainability**. [s.l.: s.n.]. p. 53–108.
- AQUINO, G. S. DE *et al.* Sugarcane straw management and its impact on production and development of ratoons. **Industrial Crops and Products**, v. 102, p. 58–64, 1 ago. 2017.
- AUDE, M. I. DA S. ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR E SUAS RELAÇÕES COM A PRODUTIVIDADE. **Ciência Rural**, v. 23, n. 2, p. 241–248, ago. 1993.
- AZEVEDO, R. A. *et al.* Sugarcane Under Pressure: An Overview of Biochemical and Physiological Studies of Abiotic Stress. **Tropical Plant Biology**, v. 4, n. 1, p. 42–51, 28 mar. 2011.
- BACCHI, O. O. S.; SOUSA, J. A. G. C. Minimum threshold temperature for sugarcane growth. **Proceedings of the Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists**, v. 16, n. 2, p. 1733–1742, 1977.
- BAKKER, H. Environmental aspects. In: **Sugar Cane Cultivation and Management**. [s.l.] Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999. p. 81–86.
- BALIZA, D. P. *et al.* Efeito da interação silício-nitrogênio sobre o crescimento do arrozXXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, de 05 a 10 de agosto de 2007. **Anais...Gramado-RS: 2007**Disponível em: <http://www.nutricaoeplantas.agr.br/site/downloads/Si_N_arroz2.pdf>
- BARBIERI, É. J. *et al.* Um novo clorofilômetro para estimar os teores de clorofila em folhas do capim Tifton 85. **Ciencia Rural**, v. 42, n. 12, 2012.
- BARBOSA, A. M. *et al.* Biomass and bioenergy partitioning of sugarcane plants under water deficit. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 37, n. 8, p. 142, 8 ago. 2015.
- BARBOSA, F. DA S. **Produtividade de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento: interações entre variedades, lâminas e intensidade do déficit hídrico na fase de maturação**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2015.
- BARBOSA, F. S. *et al.* Índices de clorofila para variedades de cana-de-açúcar sob dois níveis de irrigaçãoIX Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola-CLIA 2010, XXXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola-CONBEA 2010, Vitória, ES, Brasil, 25 a 29 de julho 2010. **Anais...2010**
- BARROS, T. H. DA S. **Eficiência do uso da água em cana-de-açúcar irrigada por gotejamento com base em medições de trocas gasosas IRGA : fotossíntese e transpiração**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2015.
- BARTH, G. Inibidores de urease e de nitrificação na eficiência de uso de adubos nitrogenados. [s.l.] Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2009.
- BASTOS, J. C. H. A. DA. **A escória de siderurgia como material corretivo e a interação com a adubação nitrogenada em cana-de-açúcar**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2008a.
- _____. **A escória de siderurgia como material corretivo e a interação com a adubação nitrogenada em cana-de-açúcar**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2008b.
- BATISTA, L. M. T. **Avaliação morfofisiológica da cana-de-açúcar sob diferentes regimes hídricos**. [s.l.] Universidade de Brasília, 12 mar. 2013.
- BEGUM, M. K. *et al.* Effect of Water Stress on Physiological Characters and Juice Quality of Sugarcane. **Sugar Tech**, v. 14, n. 2, p. 161–167, 11 jun. 2012.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de Irrigação. In: **Manual de Irrigação**. 8. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2006. p. 625.
- BERNDES, G. Bioenergy and water: challenges and opportunities. In: DALLEMAND, J. F.; GERBENS-LEENES, P. W. (Eds.). **Bioenergy and Water**. [s.l.: s.n.]. p. 49–60.
- BESSEMBINDER, J. J. E. *et al.* Which crop and which drop, and the scope for improvement of water productivity. **Agricultural Water Management**, v. 73, n. 2, p. 113–130, 2005.

- BEZERRA, B. K. L. **Adubação com silício e tolerância ao déficit hídrico em cana-de-açúcar.** [s.l.] Universidade Estadual Paulista (UNESP), 26 fev. 2015.
- BLECKER, S. W. *et al.* Biologic cycling of silica across a grassland bioclimosequence. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 20, n. 3, p. n/a-n/a, set. 2006.
- BLUM, A. **Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress** *Field Crops Research*, jun. 2009. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378429009000860>>. Acesso em: 7 jun. 2017
- BOKHTIAR, S. M. *et al.* EFFECTS OF SILICON ON YIELD CONTRIBUTING PARAMETERS AND ITS ACCUMULATION IN ABAXIAL EPIDERMIS OF SUGARCANE LEAF BLADES USING ENERGY DISPERSIVE X-RAY ANALYSIS. **Journal of Plant Nutrition**, v. 35, n. 8, p. 1255–1275, 15 maio 2012.
- BONNETT, G. D.; HEWITT, M. L.; GLASSOP, D. Effects of high temperature on the growth and composition of sugarcane internodes. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 57, n. 10, p. 1087–1095, 2006.
- BONOW, J. F. *et al.* **AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE CLOROFILA EM GENÓTIPOS DE CANA-DE-AÇÚCAR (SACCHARUM OFFICINARUM)** (S. D. dos Anjos & S. I. R. de Almeida, Eds.) SIMPÓSIO ESTADUAL DE AGROENERGIA, IV REUNIÃO TÉCNICA DE AGROENERGIA-RS, 2012. **Anais...**Porto Alegre: Embrapa Clima Temperado-Artigo em anais de congresso (ALICE), 2012Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/75328/1/104.pdf>>. Acesso em: 31 maio. 2018
- BORGES, B. M. M. N. **Resposta da segunda soqueira da cana-de-açúcar à aplicação de nitrogênio na presença e ausência de silício.** [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2012.
- BOTHA, F. C.; MOORE, P. H. Biomass and Bioenergy. *In*: MOORE, P. H.; BOTHA, F. C. (Eds.). **Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology**. First Edit ed. [s.l.] John Wiley & Sons, Inc., 2014. v. 33p. 521–540.
- BRALTS, V. F.; EDWARDS, D. M. Field-Evaluation of Drip Irrigation Submain Units. **Transactions of the Asae**, v. 29, n. 6, p. 1659–1664, 1986.
- BRAUMAN, K. A.; SIEBERT, S.; FOLEY, J. A. Improvements in crop water productivity increase water sustainability and food security—a global analysis. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 2, p. 024–030, 1 jun. 2013.
- BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C. M. Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas. **Ciência Rural**, v. 30, n. 2, p. 365–372, abr. 2000.
- BULL, T. The sugarcane plant. *In*: HOGARTH, M.; ALLSOPP, P. (Eds.). **Manual of canegrowing**. Indooroopilly: Bureau of Sugar Experiment Stations, 2000. p. 71–89.
- BUTLER, D. W. F.; MEYER, J. H.; SCHUMANN, A. W. **Assessing nitrogen fertigation strategies for drip irrigated sugarcane in southern Africa**Proceedings of annual congress South African Sugar-Technologists' Association. **Anais...**2002Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.381.7954&rep=rep1&type=pdf>>
- CABRAL, O. M. R. *et al.* Water use in a sugarcane plantation. **GCB Bioenergy**, v. 4, n. 5, p. 555–565, set. 2012.
- CAMARGO, M. S. DE *et al.* Absorção de silício, produtividade e incidência de diatraea saccharalis em cultivares de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 69, n. 4, p. 937–944, 2010.
- ____. Efeito do silício na tolerância das plantas aos estresses bióticos e abióticos. **Informações agronômicas**, v. 155, n. Setembro, p. 1–8, 2016.
- CAMARGO, M. S. DE *et al.* Silicon fertilization reduces the deleterious effects of water deficit in sugarcane. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 17, n. 1, p. 99–111, 2017.
- CAMARGO, M. S. DE; JÚNIOR, A. R. G.; KORNDÖRFER, G. H. **Silicate fertilization in tropical soils: silicon availability and recovery by sugarcane among three cycles**Proceedings of The 5th International Conference on Silicon in Agriculture, September 13-18. **Anais...**Beijing, China: 2011
- CAMARGO, M. S. DE; KORNDÖRFER, G. H.; WYLER, P. Silicate fertilization of sugarcane cultivated in tropical soils. **Field Crops Research**, v. 167, p. 64–75, 2014.
- CAMARGO, M. S. DE; ROCHA, G.; KORNDÖRFER, G. H. Silicate fertilization of tropical soils: silicon availability and recovery index of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 5, p. 1267–1275, out. 2013.
- CAPUTO, M. M. *et al.* Resposta de genótipos de cana-de-açúcar à aplicação de indutores de maturação. **Bragantia**, v. 67, n. 1, p. 15–23, 2008.
- CARDOZO, N. P. **Modelagem da maturação da cana-de-açúcar em função de variáveis meteorológicas.** [s.l.] Universidade de São Paulo, 2012.
- CARMO, J. F. A. *et al.* **Análise biométrica da cana-de-açúcar irrigada em relação aos graus-dia acumulados no Submédio do São Francisco**CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16., 2010, Belém, PA. A Amazônia e o clima global: anais. Belém, PA: SBMET. **Anais...**Embrapa Semiárido-Artigo em anais de congresso (ALICE), 2010Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/871069/1/Magna2010.pdf>>. Acesso em: 8 maio. 2018
- CARR, M. K. V.; KNOX, J. W. The water relations and irrigation requirements of sugar cane (*Saccharum officinarum*): A review. **Experimental Agriculture**, v. 47, n. 01, p. 1–25, 26 jan. 2011.

- CARVALHO-PUPATTO, J. G.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C. Atributos químicos do solo, crescimento radicular e produtividade do arroz de acordo com a aplicação de escórias. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 12, p. 1213–1218, 2004.
- CHAVES, L. H. G. *et al.* ADUBAÇÃO SILICATADA E LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO NO CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR. **GLOBAL SCIENCE AND TECHNOLOGY**, v. 6, n. 3, p. 67–78, 2013.
- CHEAVEGATTI-GIANOTTO, A. *et al.* Sugarcane (*Saccharum X officinarum*): A Reference Study for the Regulation of Genetically Modified Cultivars in Brazil. **Tropical plant biology**, v. 4, n. 1, p. 62–89, mar. 2011.
- CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**: California agricultural experimental station. California: [s.n.].
- CLEMENTE, P. R. A. *et al.* Root growth and yield of sugarcane as a function of increasing gypsum doses. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 47, n. 1, p. 110–117, mar. 2017.
- COELHO, R. D. *et al.* **Water productivity into biomass and energy for 24 Brazilian sugarcane varieties under drip irrigation** American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2012, ASABE 2012. **Anais...**2012
- CONAB. **Série Histórica**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=&Pagina_objcmsconteudos=2#A_objcmsconteudos>.
- CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, A. E; PAULO, Á. DO E. DE S. **Manual de Instruções CONSECANA -SP** Piracicaba, 2006. Disponível em: <http://www.orplana.com.br/manual_2006.pdf>. Acesso em: 19 set. 2015
- COOKE, J.; DEGABRIEL, J. L.; HARTLEY, S. E. The functional ecology of plant silicon: geoscience to genes. **Functional Ecology**, v. 30, n. 8, p. 1270–1276, ago. 2016.
- COOKE, J.; LEISHMAN, M. R. Is plant ecology more siliceous than we realise? **Trends in Plant Science**, v. 16, n. 2, p. 61–68, fev. 2011.
- COSTA, T. S. *et al.* Crescimento e produtividade de quatro variedades de cana-de- açúcar no quarto ciclo de cultivo. **Revista Caatinga**, v. 24, n. 3, p. 56–63, 2011.
- CRUSCIOL, C. A. C. *et al.* Effects of surface application of calcium-magnesium silicate and gypsum on soil fertility and sugarcane yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 1843–1854, 2014.
- DALRI, A. B.; CRUZ, R. L. Produtividade da cana-de-açúcar fertirrigada com N e K via gotejamento subsuperficial. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 3, p. 516–524, set. 2008.
- DAROS, E.; OLIVEIRA, R. A. DE; BARBOSA, G. V. DE S. **45 anos de variedades RB de cana-de-açúcar: 25 anos de Ridesa**. Curitiba: Graciosa: [s.n.].
- DELLABIGLIA, W. J. **Disponibilidade hídrica e utilização do nitrogênio em cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista (UNESP), 24 fev. 2016.
- DEREN, C. W.; GLAZ, B.; SNYDER, G. H. Leaf-tissue silicon content of sugarcane genotypes grown on everglades histosols 1. **Journal of Plant Nutrition**, v. 16, n. 11, p. 2273–2280, nov. 1993.
- DESCHEEMAEKER, K. *et al.* Increasing Water Productivity in Agriculture. *In*: BOELEEE, E. (Ed.). **Managing Water and Agroecosystems for Food Security**. Oxfordshire, UK: CAB International (CABI), 2013. v. 10p. 104–123.
- DHANAPAL, R. *et al.* Efficient Water Management in Sugarcane with Composted Coir Pith and Sugarcane Trash Under Tropical Indian Conditions. **Sugar Tech**, p. 1–9, 8 fev. 2018.
- DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELLOS, A. C. M. DE; LANDELL, M. G. DE A. (EDS.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008.
- DONOSO, G. *et al.* Water efficiency: Status and trends. *In*: WILLAARTS, B. A.; GARRIDO, A.; LLAMAS, M. . (Eds.). **Water for food and wellbeing in Latin America and the Caribbean. Social and environmental implications for a globalized economy**. First edit ed. New York, USA: The Botín Foundation, 2014. p. 261–283.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO Rome (Italia), 1979.
- DUARTE, L. S. C. F. *et al.* Analysis of genetic variability and agroindustrial characteristics in sugarcane. **International Journal of Current Research**, v. 9, n. 10, p. 58483–58491, 2017.
- EBRAHIM, M. K. *et al.* Growth and sugar storage in sugarcane grown at temperatures below and above optimum. **Journal of Plant Physiology**, v. 153, n. 5–6, p. 593–602, 1 jan. 1998.
- EBRAHIM, M. K. H. *et al.* Photosynthetic performance and adaptation of sugarcane at suboptimal temperatures. **Journal of Plant Physiology**, v. 153, n. 5, p. 587–592, 1998.
- EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise Solo**. Rio de Janeiro: [s.n.].
- EPSTEIN, E. SILICON. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 50, n. 1, p. 641–664, jun. 1999.
- _____. Chapter 1 Silicon in plants: Facts vs. concepts. **Studies in Plant Science**, v. 8, p. 1–15, 2001.
- EVERINGHAM, Y. *et al.* A Dual Ensemble Agroclimate Modelling Procedure to Assess Climate Change Impacts on Sugarcane Production in Australia. **Agricultural Sciences**, n. August, p. 870–888, 2015.
- FALLAH, A. Silicon effect on lodging parameters of rice plants under hydroponic culture. **International Journal of AgriScience**, v. 2, n. 7, p. 630–634, 2012.
- FAOSTAT. **Data - dataset - Crops, National Production**. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

- FARIAS, C. H. A. *et al.* Eficiência no uso da água na cana-de-açúcar sob diferentes lâminas de irrigação e níveis de zinco no litoral paraibano. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 3, p. 494–506, set. 2008.
- FERNANDES, A. C. **Cálculo na Agroindústria da Cana-de-açúcar**. Terceira ed. Piracicaba: Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil (STAB), 2011.
- FERREIRA JUNIOR, R. A. *et al.* Crescimento e fotossíntese de cana-de-açúcar em função de variáveis biométricas e meteorológicas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 11, p. 1229–1236, nov. 2012.
- FILGUEIRAS, O. Silício na agricultura. **PESQUISA FAPESP**, p. 72–74, 2007.
- FONSECA, I. M. **Atributos químicos do solo, nutrição e produtividade da cana-planta em função da aplicação de nitrogênio e de escória de siderurgia**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2011.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **Sugarcane**. Disponível em: <<http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/sugarcane/en/>>. Acesso em: 15 jan. 2018.
- FRANÇA, Á. E. D. DE *et al.* **DESEMPENHO AGROINDUSTRIAL DE CLONES RB DE CANA-DE-AÇÚCAR DA SÉRIE 03 NAS SAFRAS 2010/2011, 2011/2012 E 2012/2013** XIII JORNADA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO – JEPEX 2013 – UFRPE: Recife, 09 a 13 de dezembro. DESEMPENHO. **Anais...** 2013
- FREITAS, L. B. DE; FERNANDES, D. M.; MAIA, S. C. M. ÍNDICE DE CLOROFILA EM PLANTAS DE ARROZ DE TERRAS ALTAS SUBMETIDAS A ESTRESSE POR ALUMÍNIO E APLICAÇÃO DE SILÍCIO. **Journal of Agronomic Sciences**, n. 22, p. 229–241, 2013.
- FRIZZONE, J. A.; LIMA, S. C. R. V.; COSTA, R. N. T. **Irrigação: da conservação de água e solo à sustentabilidade com visitas à autogestão**. Fortaleza, Brazil: INOVAGRI, 2014.
- GALDINO, J. J. B. *et al.* **QUAL O POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ETANOL A PARTIR DA CANA-DE-AÇÚCAR SEM IRRIGAÇÃO NA ZONA DA MATA DE PERNAMBUCO?** XIII JORNADA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO – JEPEX 2013 – UFRPE: Recife, 09 a 13 de dezembro. **Anais...** 2013 Disponível em: <<http://www.eventosufrpe.com.br/2013/cd/resumos/R1476-1.pdf>>. Acesso em: 22 maio. 2018
- GAVA, G. J. DE C. *et al.* Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 250–255, mar. 2011.
- GHEEWALA, S. H.; BERNDEN, G.; JEWITT, G. The bioenergy and water nexus. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 4, p. 353–360, 1 jul. 2011.
- GILPIN, L. C.; DAVIDSON, K.; ROBERTS, E. The influence of changes in nitrogen: Silicon ratios on diatom growth dynamics. **Journal of Sea Research**, v. 51, n. 1, p. 21–35, 2004.
- GLASZIOU, K. T. *et al.* Physiology of sugar-cane VII. Effects of temperature, photoperiod duration, and diurnal and seasonal temperature changes on growth and ripening. **Australian Journal of Biological Sciences**, v. 18, n. 1, p. 53–66, 1965.
- GONÇALVES, E. R. **Fotossíntese, osmorregulação e crescimento inicial de quatro variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica**. [s.l.] Universidade Federal de Alagoas, 6 maio 2008.
- GONÇALVES, E. R. *et al.* Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 378–386, abr. 2010.
- GRANDTZ, D. A.; MEINZER, F. C. Stomatal response to humidity in a sugarcane field: simultaneous porometric and micrometeorological measurements*. **Plant, Cell and Environment**, v. 13, n. 1, p. 27–37, 1 jan. 1990.
- GUNTZER, F.; KELLER, C.; MEUNIER, J.-D. Benefits of plant silicon for crops: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 32, n. 1, p. 201–213, 30 jan. 2012.
- HAMDY, A.; RAGAB, R.; SCARASCIA-MUGNOZZA, E. Coping with water scarcity: water saving and increasing water productivity. **Irrigation and Drainage**, v. 52, n. 1, p. 3–20, 1 mar. 2003.
- HARTT, C. E. The Effect of Temperature upon Translocation of C in Sugarcane. **Plant physiology**, v. 40, n. 1, p. 74–81, 1965.
- HATFIELD, J. L.; PRUEGER, J. H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. **Weather and Climate Extremes**, v. 10, p. 4–10, dez. 2015.
- HAYNES, R. J. The nature of biogenic Si and its potential role in Si supply in agricultural soils. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 245, p. 100–111, 1 jul. 2017.
- HODSON, M. J. *et al.* Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. **Annals of Botany**, v. 96, n. 6, p. 1027–1046, 2005.
- HUNSIGI, G. **Production of Sugarcane**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1993. v. 21
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola - LSPA**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematico-da-producao-agricola.html?=&t=o-que-e>>.
- INMAN-BAMBER, G. Sugarcane Yields and Yield-Limiting Processes. In: MOORE, P. H.; BOTHA, F. C. (Eds.). **Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology**. First Edit ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2013. p. 579–600.

- INMAN-BAMBER, N. G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, v. 36, n. 1, p. 41–51, 1 jan. 1994.
- INMAN-BAMBER, N. G. G.; SMITH, D. M. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2–3, p. 185–202, 14 jun. 2005.
- INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2, p. 185–202, 2005.
- JAIN, R. *et al.* Low temperature stress-induced biochemical changes affect stubble bud sprouting in sugarcane (*Saccharum spp. hybrid*). **Plant Growth Regulation**, v. 53, n. 1, p. 17–23, 2 ago. 2007.
- JAMES, G. (ED.). **Sugarcane**. Second Edi ed. [s.l.] Blackwell Science Ltd, 2004.
- KAFFKA, S. R.; GRANTZ, D. A. Sugar Crops. *In: Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*. [s.l.: s.n.]. p. 240–260.
- KANG, S. *et al.* Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under changing environment: From research to practice. **Agricultural Water Management**, v. 179, p. 5–17, 1 jan. 2017.
- KAPUR, R. *et al.* Harvest index and the components of biological yield in sugarcane. **Indian Journal of Genetics and Plant Breeding**, v. 73, n. 4, p. 386, 2013.
- KEEPING, M. G. *et al.* Provision of nitrogen as ammonium rather than nitrate increases silicon uptake in sugarcane. **AoB PLANTS**, v. 7, p. plu080-plu080, 19 jan. 2015.
- KEEPING, M. G.; MILES, N.; SEWPERSAD, C. Silicon reduces impact of plant nitrogen in promoting stalk borer (*Eldana saccharina*) but not sugarcane thrips (*Fulmekiola serrata*) infestations in sugarcane. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, n. June, p. doi: 10.3389/fpls.2014.00289, 2014.
- KINGSTON, G. Benchmarking yield of sugarcane from estimates of crop water use. **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists**, v. 16, p. 201–209, 1994.
- KINGSTON, G. Mineral Nutrition of Sugarcane. *In: MOORE, P. H.; BOTHA, F. C. (Eds.). . Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology*. First Edit ed. [s.l.] John Wiley & Sons, Inc., 2014. p. 85–120.
- KORNDÖRFER, A. P. Efeito do silício na indução de resistência à cigarrinha-das-raízes *Mahanarva fimbriolata* Stål (Hemiptera : Cercopidae) em cultivares de cana-de-açúcar. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2010.
- KORNDÖRFER, G. H. **Uso do Silício na agricultura**. Disponível em: <<http://www.dpv24.iciag.ufu.br/Silicio/Efeitos/Efeitos.htm>>.
- KORNDÖRFER, G. H.; NOLLA, A.; RAMOS, L. A. **Available silicon in tropical soils and crop yield** III Silicon in Agriculture Conference. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. **Anais...2005** Disponível em: <[http://www.siliforce.com/pdf/7c/Gaspar - Available Silicon in tropical soil.pdf](http://www.siliforce.com/pdf/7c/Gaspar-Available%20Silicon%20in%20tropical%20soil.pdf)>
- KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Papel do Silício na Produção de Cana-de-Açúcar. **STAB**, v. 21, n. 2, p. 6–9, 2002a.
- _____. Papel do Silício na Produção de Cana-de-Açúcar. **Stab**, v. 21, n. 2, p. 2000–2003, 2002b.
- KORNDÖRFER, P. H. *et al.* Efeito da adubação silicatada sobre gramíneas forrageiras e características químicas do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 2, p. 119–125, 2010.
- KUMAR, M. *et al.* Solar powered micro-irrigation system for small holders of dryland agriculture in India. **Agricultural Water Management**, v. 158, p. 112–119, ago. 2015.
- KUMAR, M. D.; AMARASINGHE, U. A. **Water Productivity Improvements in Indian Agriculture: Potentials, Constraints and Prospects** (I. W. M. I. (IWMI), Ed.) Proceedings of the Second National Workshop on Strategic Issues in Indian Irrigation, New Delhi, India, 8-9 April 2009. **Anais...New Delhi, India: International Water Management Institute (IWMI), 2009** Disponível em: <<http://publications.iwmi.org/pdf/H042634.pdf>>
- KUMAR, M. D.; DAM, J. C. VAN. **Improving Water Productivity in Agriculture in India: Beyond ‘ More Crop per Drop ’**: Strategic Analyses of the National River Linking Project (NRLP) of India Series 4. Colombo, Sri Lanka: [s.n.]. Disponível em: <<http://publications.iwmi.org/pdf/H042639.pdf>>. Acesso em: 25 jun. 2018.
- KVEDARAS, O. L. *et al.* Water stress augments silicon-mediated resistance of susceptible sugarcane cultivars to the stalk borer *Eldana saccharina* (Lepidoptera: Pyralidae). **Bulletin of Entomological Research**, v. 97, n. 02, p. 175, 5 abr. 2007.
- LANDELL, M. G. DE A. *et al.* Sistema de multiplicação de cana-de-açúcar com uso de mudas pré brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas. **Documentos IAC, Documentos IAC**. v. 109, p. 16, 2012.
- LEAL, D. P. V. **Evapotranspiração da cana-de-açúcar e fotossíntese acumulada em biomassa e energia, para diferentes variedades, disponibilidades hídricas no solo e ciclos de cultivos**. [s.l.] Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2012.
- LEAL, D. P. V. *et al.* Water productivity for sugar and biomass of sugarcane varieties. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 9, p. 618–622, set. 2017.
- LEVIDOW, L. *et al.* Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices. **Agricultural Water Management**, v. 146, p. 84–94, 1 dez. 2014.
- LIANG, K. *et al.* Grain yield, water productivity and CH₄ emission of irrigated rice in response to water management in south China. **Agricultural Water Management**, v. 163, p. 319–331, jan. 2016.
- LIONNET, G. R. E.; WALTHER, D. C. **Aspects of the effects of silica during cane sugar processing** Proc S Afr Sug Technol Ass. **Anais...2004** Disponível em: <<http://www.sasta.co.za/wp->

- content/uploads/Proceedings/2000s/2004_lionnet_ASPECTS OF THE EFFECTS OF SILICA.pdf>
- LIU, D. L.; KINGSTON, G.; BULL, T. A. A new technique for determining the thermal parameters of phenological development in sugarcane, including suboptimum and supra-optimum temperature regimes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 90, n. 1–2, p. 119–139, 1 mar. 1998.
- LUYCKX, M. *et al.* Silicon and Plants: Current Knowledge and Technological Perspectives. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n. 411, p. 1–8, 2017.
- MA, J. F.; TAKAHASHI, E. Functions of silicon in plant growth. *In: Soil, Fertilizer, and Plant Silicon Research in Japan*. [s.l.] Elsevier, 2002. p. 107–180.
- MADEIROS, L. B.; VIEIRA, A. DE O.; AQUINO, B. F. DE. Micronutrientes e silício nas folhas de cana-de-açúcar: escória siderúrgica aplicado no solo. **Engenharia Ambiental**, v. 6, n. 1, p. 27–37, 2009.
- MAIA JÚNIOR, S. DE O. *et al.* CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA E PRODUTIVA E SUAS CORRELAÇÕES EM CULTIVARES DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Revista Ciência Agrícola**, v. 16, n. 1, p. 31–42, 23 maio 2018.
- MAJEED ZARGAR, S. *et al.* Silicon in Plant Tolerance Against Environmental Stressors: Towards Crop Improvement Using Omics Approaches. **Current Proteomics**, v. 7, n. 2, p. 135–143, 1 jul. 2010.
- MANSANO, M. V. *et al.* Atributos químicos do solo e desenvolvimento da cultura do trigo em função da adubação silicatada. **Revista Agrarian**, v. 7, n. 25, p. 390–400, 2 abr. 2014.
- MARAFON, A. C. **Análise quantitativa de crescimento em Cana-de-açúcar: Uma introdução ao procedimento prático**. Documentos 168: Documentos. Aracaju, Brasil: [s.n.]. Disponível em: <http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2012/doc_168.pdf>. Acesso em: 29 maio. 2018.
- MARAFON, A. C.; ENDRES, L. **Adubação silicatada em cana-de-açúcar**. Aracaju, Brasil: Embrapa, 2011. Disponível em: <http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2011/doc_165.pdf>.
- MARIN, F. R. **Fenologia**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_68_22122006154840.html>.
- MARIN, F. R. **Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2014.
- MARQUES, T. A.; SILVA, H. W. DA. Crescimento vegetativo e maturação em três cultivares de cana-de-açúcar. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 8, n. 1, p. 54–60, 2008.
- MASCHIO, R. **Produtividade da água em biomassa e energia para 24 variedades**. Piracicaba: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 15 jul. 2011.
- MATSUOKA, S. *et al.* Sugarcane Bioenergy. *In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (Eds.). . Sugarcane*. Amsterdam: Elsevier, 2015. p. 383–405.
- MAUD, M.; CRUSCIOL, C. A. C.; *et al.* Nitrogen and silicon fertilization of upland rice. **Scientia Agrícola**, v. 60, n. 4, p. 761–765, 2003.
- MAUD, M.; GRASSI FILHO, H.; *et al.* TEORES DE SILÍCIO NO SOLO E NA PLANTA DE ARROZ DE TERRAS ALTAS COM DIFERENTES DOSES DE ADUBAÇÃO SILICATADA E NITROGENADA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 867–873, 2003.
- MCISAAC, G. F. Biomass Production and Water: A Brief Review of Recent Research. **Current Sustainable/Renewable Energy Reports**, v. 1, n. 4, p. 157–161, 20 dez. 2014.
- MEDEIROS, L. B.; VIEIRA, A. DE O.; AQUINO, B. F. DE. Influência da escória siderúrgica sobre trocas gasosas e produção de biomassa da cana-de-açúcar. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 6, n. 2, p. 121–129, 2009.
- MEHAREB, E. M.; SALEM, E.-A. S. R.; GHONEMA, M. A. Temperature and relative humidity effects on sugarcane flowering under natural conditions in Egypt. **Indian Journal of Sugarcane Technology**, v. 32, n. 1, p. 13–19, 2017.
- MOLDEN, D. *et al.* A Water-productivity Framework for Understanding and Action. *In: KIJNE, J. W.; BARKER, R.; MOLDEN, D. (Eds.). . Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement*. Cambridge: CAB International (CABI), 2003. p. 1–18.
- _____. Pathways for increasing agricultural water productivity. *In: MOLDEN, D. (Ed.). . Water for Food Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. London, UK: Taylor and Francis AS, 2007. p. 279–314.
- _____. Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 4, p. 528–535, 1 abr. 2010.
- MOLDEN, D.; SAKTHIVADIVEL, R. Water Accounting to Assess Use and Productivity of Water. **International Journal of Water Resources Development**, v. 15, n. 1–2, p. 55–71, mar. 1999.
- MOORE, P. H.; BOTHA, F. C. (EDS.). **Sugarcane : Physiology , Biochemistry , and Functional Biology**. [s.l.] John Wiley & Sons, Inc., 2014.
- MORO, A. L. **RELAÇÃO ENTRE SILÍCIO E DEFICIÊNCIA HÍDRICA SOBRE OS ASPECTOS BIOQUÍMICOS E FISIOLÓGICOS NO ARROZ**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2012.
- MOURA, P. C. S. **Correlações entre variáveis morfológicas, fisiológicas e tecnológicas na maturação da cana-de-açúcar**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista (UNESP), 4 out. 2016.

- MUCHOVEJ, R. M.; NEWMAN, P. R. Nitrogen fertilization of sugarcane on a sandy soil: I. YIELD AND LEAF NUTRIENT COMPOSITION. **J Am Soc Sugar Cane Tech**, v. 24, p. 210–224, 2004.
- MUCHOW, R. C. R. *et al.* Radiation interception and biomass accumulation in a sugarcane crop grown under irrigated tropical conditions. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 45, n. 1, p. 37–49, 1994.
- MUCHOW, R. C.; ROBERTSON, M. J.; WOOD, A. W. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. II. Sucrose accumulation and commercial yield. **Field Crops Research**, v. 48, n. 1, p. 27–36, 1996.
- NOVAIS, R. F. *et al.* (EDS.). **Fertilidade do Solo**. 1a Edição ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.
- OLIVEIRA, A. R. DE *et al.* **Influência de Lâminas de Irrigação nas Características Tecnológicas da Cana-de-Açúcar**: Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2016. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/146038/1/BPD127.pdf>>. Acesso em: 8 maio. 2018.
- OLIVEIRA, C. E. S. DA *et al.* **Influência de fontes de silício no desenvolvimento inicial e teor de clorofila do híbrido de sorgo DKB 540** Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, CONTECC 2016, 29 de agosto a 1 de setembro de 2016. **Anais...Foz do Iguaçu: 2016** Disponível em: <[http://www.confea.org.br/media/contecc2016/agronomia/influência de fontes de silício no desenvolvimento inicial e teor de clorofila do híbrido de sorgo dkb 540.pdf](http://www.confea.org.br/media/contecc2016/agronomia/influência%20de%20fontes%20de%20silício%20no%20desenvolvimento%20inicial%20e%20teor%20de%20clorofila%20do%20híbrido%20de%20sorgo%20dkb%20540.pdf)>. Acesso em: 31 maio. 2018
- OLIVEIRA, D. C. DE *et al.* Stalk productivity and quality of three sugarcane varieties at the beginning, in the middle, and at the end of the harvest. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 4, p. 260–269, 26 jan. 2017.
- OLIVEIRA, E. C. A. DE. **Dinâmica de nutrientes na cana-de-açúcar em sistema irrigado de produção**. [s.l.] Universidade Federal Rural de Pernambuco, 28 jan. 2008.
- OLIVEIRA, E. C. A. DE *et al.* Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 9, p. 951–960, 2010.
- OLIVEIRA, E. C. A. DE *et al.* Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 6, p. 617–625, 15 jun. 2011.
- OLIVEIRA, F. J. DE *et al.* **AVALIAÇÃO DOS COMPONENTES DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA E INDUSTRIAIS EM GENÓTIPOS DE CANA-PLANTAXIII JORNADA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO – JEPEX 2013 – UFRPE: Recife, 09 a 13 de dezembro. Anais...2013** Disponível em: <<http://www.eventosufrpe.com.br/2013/cd/resumos/R1506-1.pdf>>. Acesso em: 22 maio. 2018
- OLIVEIRA, M. DE F. *et al.* Avaliação tecnológica de variedades de cana-de-açúcar influenciadas por diferentes adubações e supressões de irrigação. **Revista Ceres**, v. 59, n. 6, p. 832–840, 2012.
- OLIVEIRA, M. W. DE *et al.* Produção e qualidade de três variedades de cana-de-açúcar cultivadas no nordeste de Minas Gerais. **Revista Ciência Agrícola**, v. 12, n. 1, p. 17–20, 21 maio 2014.
- OLIVEIRA, R. A. DE *et al.* Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 2, p. 71–76, 2007.
- OLIVEIRA, R. A. DE; RAMOS, M. M.; AQUINO, L. A. DE. Irrigation Management. *In*: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (Eds.). **Sugarcane**. Amsterdam: Elsevier, 2015. p. 161–183.
- OLIVEIRA, R. C. DE *et al.* Alterações nos teores de macronutrientes em latossolo vermelho cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 8, n. 6, p. 514–527, 7 nov. 2014.
- OLIVEIRA, R. C. DE *et al.* Response of sugar cane to limitation hydric and nitrogen dose. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 17, p. 1475–1485, 28 abr. 2016.
- OLIVEIRA, T. B. A. *et al.* **EFICIÊNCIA NA INDÚSTRIA VARIÁVEL ÉPOCA DE COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ALINHAMENTO DA ECOEFICIÊNCXXXI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual: Desafios da Engenharia de Produção na Consolidação do Brasil no Cenário Econômico Mundial** Belo Horizonte, MG, Brasil, 04 a 07 de outubro de 2011. **Anais...2011** Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2011_TN_STO_135_855_18433.pdf>. Acesso em: 23 maio. 2018
- OLIVIER, F. C.; SINGELS, A. Increasing water use efficiency of irrigated sugarcane production in South Africa through better agronomic practices. **Field Crops Research**, v. 176, n. 176, p. 87–98, 2015.
- OLIVIER, F. C.; SINGELS, A. Increasing water use efficiency of irrigated sugarcane production in South Africa through better agronomic practices. **Field Crops Research**, v. 176, p. 87–98, maio 2015a.
- _____. Increasing water use efficiency of irrigated sugarcane production in South Africa through better agronomic practices. **Field Crops Research**, v. 176, p. 87–98, 1 maio 2015b.
- PENATTI, C. P. **Adubação da cana-de-açúcar: 30 anos de experiência**. São Paulo: Ottoni Editora, 2013.
- PEREIRA, L. F. M. *et al.* Sugars levels of four sugarcane genotypes in different stem portions during the maturation phase. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 89, n. 2, p. 1231–1242, 21 abr. 2017.
- PEREIRA, L. S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. **Agricultural Water Management**, v. 108, p. 39–51, 2012.
- PEREIRA, L. S.; OWEIS, T.; ZAIRI, A. Irrigation management under water scarcity. **Agricultural Water Management**, v. 57, n. 3, p. 175–206, 30 dez. 2002.
- PEREIRA, R. M. **ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR E ESTRESSE HÍDRICO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E DADOS ORBITAIS**. [s.l.] Universidade Federal de Goiás, 2015.

- PERRY, C. *et al.* Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 11, p. 1517–1524, 1 nov. 2009.
- PMGCA. **Censo Varietal de Cana-de-açúcar 2017**. Disponível em: <https://docs.wixstatic.com/ugd/097ffc_b2b8c0c5f2484c58a658b1ed3b5466b5.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2018.
- PRADO, M. DE R.; PANCELLI, M. A. Nutrição nitrogenada em soqueiras e a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. **STAB**, v. 25, n. 2, p. 60–62, 2006.
- QUINTANA, K. A. **Irrigação e fertirrigação por gotejamento para cana-de-açúcar na presença e ausência de boro**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista (UNESP), 14 abr. 2010.
- RAGAB RAGAB. **A note on Water use efficiency and water productivity**. Lancaster, United Kingdom: [s.n.]. Disponível em: <http://www.water4crops.org/wp-content/uploads/2014/08/RR_Water-use-efficiency-and-water-productivity.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2018.
- RAIJ, B. VAN *et al.* **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. Boletim técnico 100**. Campinas (SP Brasil): [s.n.].
- RAMOUTHAR, P. V.; CALDWELL, P. M.; MCFARLANE, S. A. Effect of silicon on the severity of brown rust of sugarcane in South Africa. **European Journal of Plant Pathology**, v. 145, n. 1, p. 53–60, 5 maio 2016.
- RAVEN, J. A. Cycling silicon - the role of accumulation in plants. **New Phytologist**, v. 158, n. 3, p. 419–421, 21 maio 2003.
- RIGON, J. P. G. *et al.* Non-destructive determination of photosynthetic pigments in the leaves of castor oil plants. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 34, n. 3, p. 325–329, 3 maio 2012.
- RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C.; JÚNIOR, W. F. M. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. 2. ed. [s.l.] TCC Ripoli, 2005.
- ROBERTSON, M. J.; WOOD, A. W.; MUCHOW, R. C. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. I. Radiation use, biomass accumulation and partitioning. **Field Crops Research**, v. 48, n. 1, p. 11–25, 1 set. 1996.
- ROLIM, G. DE S.; APARECIDO, L. E. DE O. Camargo, Köppen and Thornthwaite climate classification systems in defining climatic regions of the state of São Paulo, Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 2, p. 636–643, 1 fev. 2016.
- ROSA, H. J. A. *et al.* Sugarcane response to nitrogen rates, measured by a canopy reflectance sensor. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 9, p. 840–848, set. 2015.
- RUDORFF, B. F. T. *et al.* Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sensing**, v. 2, n. 4, p. 1057–1076, 9 abr. 2010.
- SAHEBI, M. *et al.* Importance of Silicon and Mechanisms of Biosilica Formation in Plants. **BioMed Research International**, v. 2015, p. 1–16, 21 jan. 2015.
- SAMUI, R. P.; GRACY, J.; KULKARNI, M. B. Impact of Weather on Yield of Sugarcane at Different Growth Stages. **Jour. Agric. Physics**, v. 3, n. 2, p. 119–125, 2003.
- SANTIAGO, A. D. *et al.* **Acumulo de biomassa seca em cana-de-açúcar RB 92579 em função da manutenção de diferentes níveis de palhada sobre o solo** RenovEnergia'14, Energias Renováveis e Transição Energética, Maceió, Alagoas, Brasil, 19 - 21 de Março de 2014. **Anais...2014** Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1001335/1/A1.2Texto61474Text.pdf>>. Acesso em: 22 maio. 2018
- SANTOS ESTEVES, B. DOS *et al.* Desenvolvimento e Balanço de energia da Cana-De-açúcar no Norte Fluminense, Brasil. **Interciencia**, v. 37, n. 6, p. 438–443, 2012.
- SANTOS, G. A. **Silício na produção de cana-de-açúcar**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
- SANTOS, L. DA C. **Produção de biomassa e eficiência no uso da água para oito variedades de cana-de-açúcar irrigadas por gotejamento em dois ciclos de cultivo**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2016.
- SANTOS, M. A. L. DOS. **Balanço hídrico, crescimento e produtividade de genótipos RB de cana-de-açúcar em cultivo de sequeiro na região de Rio Largo-AL**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista (UNESP), 27 fev. 2015.
- SARTORI, R. H. **Eficiência de uso de nitrogênio e enxofre pela cana-de-açúcar (primeira e segunda rebrota) em sistema conservacionista (sem queima)**. [s.l.] UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO CENTRO, 2010.
- SAVANT, N. K. *et al.* Silicon nutrition and sugarcane production: A review ¹. **Journal of Plant Nutrition**, v. 22, n. 12, p. 1853–1903, dez. 1999.
- SCARPARE, F. V. Bioenergy and water: Brazilian sugarcane ethanol. In: DALLEMAND, J. F.; GERBENS-LEENES, P. W. (Eds.). **Bioenergy and Water**. [s.l.: s.n.]. p. 89–102.
- SCHLICHTING, A. F. *et al.* Efficiency of portable chlorophyll meters in assessing the nutritional status of wheat plants. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 12, p. 1148–1151, dez. 2015.
- SHARMA, B.; MOLDEN, D.; COOK, S. Water use efficiency in agriculture: Measurement, current situation and trends. In: DRECHSEL, P. *et al.* (Eds.). **Managing Water and Fertilizer for Sustainable Agricultural Intensification**. Paris, France: International Fertilizer Industry Association (IFA), International Water Management Institute (IWMI), International Plant Nutrition Institute (IPNI) and International Potash Institute (IPI), 2015. p. 39–64.
- SHIGAKI, F. *et al.* Growth analysis, nitrogen accumulation, and yield of sugarcane varieties for the pre-amazon

- region of Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 40, p. 4000–4007, 6 out. 2016.
- SILVA, F. L. S. DA. **Efeitos de estresses bióticos sobre os parâmetros ecofisiológicos e componentes de produção de quatro variedades de cana-de-açúcar**. [s.l.] Universidade Federal de Sergipe, 31 jul. 2015.
- SILVA, G. P. DA. **Resposta da segunda soqueira da cana-de-açúcar à aplicação de nitrogênio na presença e ausência de silício**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2014.
- SILVA, L. C. DA. **Crescimento e acúmulo de nutrientes em sete cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) na região de Coruripe-AL**. [s.l.] Universidade Federal de Alagoas, 28 fev. 2007.
- SILVA, M. DE A.; SOARES, R. A. B.; *et al.* Agronomic performance of sugarcane families in response to water stress. **Bragantia**, v. 67, n. 3, p. 655–661, 2008.
- SILVA, M. DE A.; SILVA, J. A. G. DA; *et al.* Yield components as indicators of drought tolerance of sugarcane. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 6, p. 620–627, dez. 2008.
- SILVA, M. DE A. *et al.* Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 241–249, 1 mar. 2014.
- SILVA, N. F. DA; CUNHA, F. N.; TEIXEIRA, M. B.; SOARES, F. A. L.; MOURA, L. C. DE. Crescimento vegetativo da cana-de-açúcar submetida a lâminas de irrigação e fertirrigação nitrogenada via gotejamento subsuperficial. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 9, n. 2, p. 79–90, 10 mar. 2015.
- _____. Perfilhamento da cana-de-açúcar submetida a diferentes lâminas de irrigação e fertirrigação nitrogenada. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 9, n. 3, p. 91–101, 11 maio 2015.
- SILVA, S. *et al.* ECONOMIC DEPTH OF DRIP IRRIGATION ON SUGARCANE. **Irriga**, v. 1, n. Edição Especial IRRIGA & INOVAGRI, p. 37–46, 31 ago. 2015.
- SILVA, T. G. F. DA *et al.* Demanda hídrica e eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 12, p. 1257–1265, dez. 2011.
- _____. Biometria da parte aérea da cana soca irrigada no Submédio do Vale do São Francisco. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 43, n. 3, p. 500–509, 2012.
- SILVA, T. G. F. DA *et al.* Biomassa seca acumulada, partições e rendimento industrial da cana-de-açúcar irrigada no Semiárido brasileiro. **Revista Ceres**, v. 61, n. 5, p. 686–696, out. 2014.
- SILVA, V. S. G. DA *et al.* Agro-industrial quality of plant cane, first and second ratoon in sugarcane varieties. **AJCS**, v. 11, n. 09, p. 1216–1220, 2017.
- SILVEIRA JÚNIOR, E. G. *et al.* Silicato de cálcio e calcário na produção e qualidade da cana-de-açúcar - usina catanduva. **CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO: ALICERCE DOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO**, 39, p. 5–8, 2003.
- SIMÕES, W. L. *et al.* Respostas de variáveis fisiológicas e tecnológicas da cana-de-açúcar a diferentes sistemas de irrigação. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 1, p. 11–20, mar. 2015.
- SINCLAIR, T. R. R. *et al.* Volume of individual internodes of sugarcane stalks. **Field Crops Research**, v. 91, n. 2–3, p. 207–215, 14 fev. 2005.
- SINCLAIR, T. R.; TANNER, C. B.; BENNETT, J. M. Water-Use Efficiency in Crop Production. **BioScience**, v. 34, n. 1, p. 36–40, jan. 1984.
- SINGELS, A. *et al.* The effect of crop start date, crop class and cultivar on sugarcane canopy development and radiation interception. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2–3, p. 249–260, 14 jun. 2005.
- SINGELS, A.; SMIT, M. A. Sugarcane response to row spacing-induced competition for light. **Field Crops Research**, v. 113, n. 2, p. 149–155, ago. 2009.
- SINGH, P. N.; SHUKLA, S. K.; BHATNAGAR, V. K. Optimizing soil moisture regime to increase water use efficiency of sugarcane (*Saccharum spp.* hybrid complex) in subtropical India. **Agricultural Water Management**, v. 90, p. 95–100, maio 2007.
- SINGH, S.; SIDANA, B. K.; KUMAR, S. Water Productivity of Sugarbeet Vs Sugarcane Cultivation in Punjab. **IJIRST –International Journal for Innovative Research in Science & Technology**, v. 4, n. 9, 2018.
- SOBRAL, M. F. *et al.* Escória de siderurgia e seus efeitos nos teores de nutrientes e metais pesados em cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 8, p. 867–872, 2011.
- SONG, Z.; MÜLLER, K.; WANG, H. Biogeochemical silicon cycle and carbon sequestration in agricultural ecosystems. **Earth-Science Reviews**, v. 139, p. 268–278, 2014.
- SOUSA, R. T. X. DE; KORDÖRFER, G. H.; WANGEN, D. R. B. APROVEITAMENTO DE SILÍCIO PROVENIENTE DE ESCÓRIA SIDERÚRGICA POR CULTIVARES DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Bragantia**, v. 69, n. 3, p. 669–675, 2010.
- STEDUTO, P. *et al.* **Crop yield response to water**. [s.l.: s.n.].
- TAVARES, S. R. D. L.; AMARAL, F. C. S. DO. **Determinação do teor de fibra de cana-de-açúcar em diferentes biomas visando o processamento de resíduos para a produção de biocombustíveis sólidos e biomassa energética** CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA, 9., 2014. **Anais...Embrapa Solos**-Artigo em anais de congresso (ALICE), 2014Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/109663/1/285-SilvioTavares-317.pdf>>. Acesso em: 26 maio. 2018
- THANGAVELU, S. Harvest index — sugar yield in sugarcane genetic stocks and its association with yield attributes, nutrients ratio and sucrose. **Sugar Tech**, v. 8, n. 2–3, p. 148–151, set. 2006.

- TUBANA, B. S.; BABU, T.; DATNOFF, L. E. **A review of silicon in soils and plants and its role in us agriculture: History and future perspectives** *Soil Science*, out. 2016. Disponível em: <<http://content.wkhealth.com/linkback/openurl?sid=WKPTLP:landingpage&an=00010694-900000000-99600>>. Acesso em: 29 nov. 2016
- UNICA, U. DA I. DE C.-A. **Relatório final da safra 2016/2017, Região Centro-Sul** (A. de P. Rodrigues et al., Eds.). [s.l: s.n.].
- URIBE, R. A. M. *et al.* Ratoon sugarcane yield integrated drip-irrigation and nitrogen fertilization. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 6, p. 1124–1133, 2013.
- VASANTHI, N.; SALEENA, L. M.; RAJ, S. A. Silicon in day today life. **World J. Appl. Sci**, v. 17, p. 1425–1440, 2012.
- VASCONCELOS, Y. Lavoura mais produtiva. **Ciência e Tecnologia no Brasil Pesquisa FAPESP**, v. 264, n. 02, p. 72–76, 2018.
- VÁSQUEZ LIZCANO, J. **Poder calorífico, energia e cinzas da biomassa de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento, para diferentes variedades, lâminas e processos de maturação**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2015.
- VAZIFEDOUST, M. *et al.* Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. **Agricultural Water Management**, v. 95, n. 2, p. 89–102, 1 fev. 2008.
- VIDAL, A. D. A. **Escória de siderurgia na cultura do arroz e interação com o nitrogênio**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2008.
- VINICIUS, S. G. DA S. *et al.* Leaf area of sugarcane varieties and their correlation with biomass productivity in three cycles. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 7, p. 459–466, 16 fev. 2017.
- VITTI, A. C. *et al.* Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 2, p. 249–256, 2007.
- WACLAWOVSKY, A. J. *et al.* Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. **Plant Biotechnology Journal**, v. 8, n. 3, p. 263–276, abr. 2010.
- WANG, H. *et al.* Silicon and the Plant Extracellular Matrix. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, n. 463, 2016.
- WICHELNS, D. Water productivity and food security: considering more carefully the farm-level perspective. **Food Security**, v. 7, n. 2, p. 247–260, 26 abr. 2015.
- WIEDENFELD, R. P. Effects of irrigation and N fertilizer application on sugarcane yield and quality. **Field Crops Research**, v. 43, n. 2–3, p. 101–108, out. 1995.
- WU, I.-PA.; A. TERRY, H.; HILER, E. A. Hydraulic design of drip irrigation systems. n. 105, 1979.
- ZHU, Y.; GONG, H. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 34, n. 2, p. 455–472, 29 abr. 2014.
- ZOEHL, D. Is water productivity a useful concept in agricultural water management? **Agricultural Water Management**, v. 84, n. 3, p. 265–273, 16 ago. 2006.