

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE

ANA LÚCIA SCAVAZZA

EFEITOS DA ADUBAÇÃO NO RENDIMENTO INDUSTRIAL
DO SORGO SACARINO CULTIVADO EM SOLO DE
FERTILIDADE CONSTRUÍDA

Araras-SP

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE

ANA LÚCIA SCAVAZZA

**EFEITOS DA ADUBAÇÃO NO RENDIMENTO INDUSTRIAL
DO SORGO SACARINO CULTIVADO EM SOLO DE
FERTILIDADE CONSTRUÍDA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente como requisito para a obtenção do título de **Mestre em Agricultura e Ambiente**.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Roberto Soares

Araras-SP

2019

Scavazza, Ana Lúcia

Efeitos da adubação no rendimento industrial do sorgo sacarino cultivado em solo de fertilidade construída. / Ana Lúcia Scavazza. -- 2019.

117 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus Araras, Araras

Orientador: Prof. Dr. Marcio Roberto Soares

Banca examinadora: Prof. Dr. Marcio Roberto Soares, Prof. Dr. Miguel Ângelo Maniero, Prof. Dr. Pedro Henrique de Cerqueira Luz

Bibliografia

1. sorgo sacarino. 2. adubação. 3. fertilidade construída. I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Maria Helena Sachi do Amaral – CRB/8 7083



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Centro de Ciências Agrárias
Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente

Folha de Aprovação

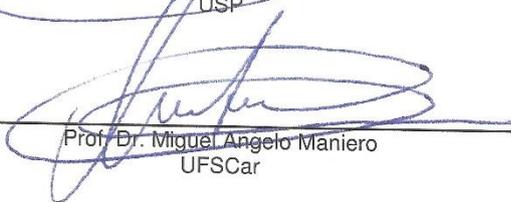
Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Ana Lúcia Scavazza, realizada em 18/02/2019:



Prof. Dr. Márcio Roberto Soares
UFSCar



Prof. Dr. Pedro Henrique de Cerqueira Luz
USP



Prof. Dr. Miguel Angelo Maniero
UFSCar

A minha amada mãe Cristina...

OFEREÇO

A toda minha família, pelos momentos vividos e por me fazer compreender a importância da vida.

DEDICO...

AGRADECIMENTOS

Primeiramente eu te agradeço, meu Deus, pois tudo que tenho na vida foi conquistado com a tua bênção, e por isso eu vos glorifico todos os dias.

A minha mãe Cristina, meu pai Luís, minhas irmãs Cláudia e Lucimara, meu cunhado William, meus avós Marlene e Nelson (*in memoriam*), meus tios e primos, é para vocês que eu dedico cada vitória. A todos os professores da UFSCar, em especial ao Dr. Marcio Roberto Soares, Dra. Maria Bernadete da Silva Campos, Dr. Miguel Ângelo Maniero, Dr. José Carlos Casagrande, Dra. Maria Teresa Mendes Ribeiro Borges e Dr. Cláudio Hartkopf Lopes (*in memoriam*), pela dedicação, humanidade, pelos conhecimentos compartilhados, confiança e apoio. Professor Marcio, faltam-me palavras para descrever o sentimento de gratidão e orgulho em ter sido sua orientada. Seus ensinamentos foram muito além daqueles inerentes à agronomia, com o senhor aprendi a enfrentar a vida com mais coragem e perseverança.

Aos amigos Paulo Henrique Pizzi de Santi, César Augusto Santana, Ana Laura Belloni e Kauê de Sousa Soares Rocha que não me abandonaram e acreditaram neste trabalho mesmo quando pensei não ter mais forças para continuá-lo. Aos companheiros do Grupo de Estudos e Pesquisas em Fertilidade do Solo (GEFERT), registro aqui minha gratidão.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente pela oportunidade e à CAPES pela concessão da bolsa de estudos. Aos amigos da pós-graduação, Ana Carolina, Thiago, Juliana, André, Altemar, Cris, Driélle, Elisângela, Flávia e José Mauro por compartilharmos juntos dificuldades, alegrias e aprendizado.

A todos os funcionários da UFSCar, especialmente aos técnicos da Seção Agrícola, Fausto, Curtolo e Maurício, e do Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar (PMGCA), Fernandinho e Dinei, que não mediram esforços para ajudar no que fosse necessário para a realização deste projeto.

Aos funcionários e estagiários Laboratório de Análise Química de Solos e Planta (DRNPA/CCA/UFSCar) e Laboratório de Análises e Simulação Tecnológica (LAST/DTaiSER/UFSCar) especialmente ao Cidinho, Larissa, João Consoni, Roberto e Sílvia pelo apoio fundamental nas análises envolvidas nesta pesquisa. A Camila Pessoto, sempre atenciosa e paciente e aos técnicos agrícolas do DRNPA Gabriela e Anselmo, pela dedicação, sabedoria e auxílio nas avaliações experimentais. A todos que direta e indiretamente contribuíram para a realização desta dissertação e a todos aqueles que torceram por mim, meus sinceros agradecimentos!

Eu queria ter na vida
Simplesmente
Um lugar de mato verde
Pra plantar e pra colher
Ter uma casinha branca
De varanda
Um quintal e uma janela
Para ver o sol nascer.

(Gilson Campos & Joran)

RESUMO

O sorgo sacarino [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], poácea originária do Centro-Leste da África, apresenta grande potencial para a produção de bioenergia. No Brasil, devido à importância da cana-de-açúcar como fonte de energia renovável, pesquisas acerca dos processos agrícola e industrial do sorgo sacarino ainda são incipientes. O objetivo desta dissertação foi testar a hipótese de que a prática da adubação em solo de fertilidade construída influencia o crescimento e maturação do sorgo sacarino, de modo a promover variações no ponto ótimo de colheita. O experimento foi conduzido em campo experimental da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), em delineamento de blocos casualizados em esquema de parcelas subdivididas, com cinco blocos, em LATOSSOLO Vermelho distrófico. Os tratamentos foram compostos por quatro doses de adubação, 0, 0,5; 1,0 e 1,5 da dose recomendada-DR (110-80-120 kg ha⁻¹) de NPK para o híbrido de sorgo sacarino Malibu 5010 nas condições do Estado de São Paulo, e por quatro épocas de colheita: 90,105,120 e 135 dias após a emergência. Foram determinadas características biométricas [altura (m), diâmetro do colmo (mm), número de entrenós (nº nós planta⁻¹), biomassa verde (t ha⁻¹), biomassa seca (t ha⁻¹), massa seca da panícula (g m⁻¹)], tecnológicos [brix (%), Pol do caldo (%), fibra (%), pureza (%), AR (%), ATR (kg t⁻¹)], de produtividade [produtividade de colmos (PC, t ha⁻¹)], além do acúmulo de NPK para o cálculo de índices de eficiência nutricional. Realizou-se levantamento de informações sobre a fertilidade do solo de áreas de reforma de cana-de-açúcar, para determinação do nível de fertilidade e para propor a viabilidade de cultivo de sorgo sacarino com doses reduzidas de macronutrientes. O aumento da adubação em solo de fertilidade construída não promoveu alterações nas variáveis de crescimento e de produtividade do sorgo sacarino de maneira a alterar o ponto ótimo de colheita. Os efeitos isolados dos fatores mostraram que a produtividade de colmos, um dos indicadores mais importantes para a produção de etanol, apresentou média superior com aplicação de 1,5DR (165-120-180 kg de NPK ha⁻¹), sendo que as épocas de colheita não diferiram. No entanto, a avaliação econômica revelou a inviabilidade da prática de adubação, em virtude da alta produtividade obtida em 0DR. Devido à alta incidência da doença açucarada, foi afetado o conteúdo de sacarose, ATR, AR e as demais variáveis tecnológicas. No entanto, houve o indicativo de que a adubação influenciou a maturação de forma a promover alterações no ponto ótimo de colheita, destacando 1,0DR como melhor aporte de NPK, e a época de corte aos 120DAE como mais indicada para o híbrido testado. Devido à alta produção de matéria seca, o híbrido de sorgo sacarino Malibu 5010 acumulou NPK na ordem de N>K>P (319,89; 272,53; 28,59 kg ha⁻¹, respectivamente), sem diferenças significativas entre as doses aplicadas. A eficiência nutricional foi maior nos tratamentos com menores doses de NPK, sendo a EUt um dos índices que melhor permitiu avaliar a influência da fertilidade construída do solo sobre a eficiência de uso dos nutrientes. A fertilidade de áreas cultivadas com cana-de-açúcar pode ser considerada média e em processo de construção, o que possibilitaria respostas do sorgo sacarino à aplicação de nutrientes.

Palavras-chave: nutrição de plantas; NPK; bioenergia, *Sorghum bicolor*.

ABSTRACT

The sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), a poaceae originating in Eastern Central of Africa, has great potential for the production of bioenergy. In Brazil, due to the importance of sugarcane as a source of renewable energy, research on the agricultural and industrial processes of sorghum is still incipient. The objective of this dissertation was to test the hypothesis that the practice of fertilization in soil with improved fertility built influences the growth and maturation of sweet sorghum, in order to that what of promoting variations in the optimum point of harvest. The experiment was conducted in an experimental field of the Federal University of São Carlos (UFSCar), in a randomized complete block design with five blocks. The treatments were composed of four doses of fertilization, 0, 0.5, 1.0 and 1.5 of the recommended dose-RD (110-80-120 kg ha⁻¹) of NPK for the cultivation of hybrid sweet sorghum Malibu 5010 under the conditions of the state of São Paulo, and for four harvest seasons: 90,105,120 and 135 days after the emergency (DAE). Biometric parameters were determined [height (m), diameter of the stem (mm), number of internodes (nodes plant⁻¹), production of stems (t ha⁻¹), biomass (t ha⁻¹), dry biomass (t ha⁻¹), dry mass of panicle (g m⁻¹)], technological [brix of broth (%), Pol of broth (%), fiber (%), purity (%), RS (%), RTS (kg t⁻¹)], productivity [yield of stalks (PC, t ha⁻¹)], besides the accumulation of NPK for the calculation of indices of nutritional efficiency. Data were collected on the soil fertility of sugarcane reform areas to determine the fertility level and to propose the viability of sorghum cultivation with reduced doses of macronutrients. The increase of fertilization in built fertility soil did not promote changes in the parameters of growth and yield of sorghum in order to change the optimum harvest point. The isolated effects of the factors showed that the yield of stalks, one of the most important indicators for ethanol production, presented a higher average with application of 1.5RD (165-120-180 kg of NPK ha⁻¹). Harvesting times did not differ. However, the economic evaluation revealed the impracticability of the fertilization practice, due to the high productivity obtained in 0RD. Due to the high incidence of *Ergot* disease, the content of sucrose (Pol), RTS, SR and the other technological variables were affected. However, there was an indication that the fertilization influenced the maturation in order to promote changes at the optimum harvest point, highlighting the 1,0RD as the best NPK contribution, and the cutting season at 120DAE as the best indicated for the tested cultivar. Due to the high dry matter production, Malibu 5010 sorghum hybrid accumulated NPK in the order of N <K <P (319.89; 272.53; 28.59 kg ha⁻¹, respectively), without significant differences between the applied doses. The nutritional efficiency was higher in the treatments with lower doses of NPK, and the efficiency of use (EUt) was one of the indices that better allowed to evaluate the influence of soil fertility on the performance of sweet sorghum. The fertility of areas cultivated with sugarcane can be considered medium and in the process of construction, which would allow responses of sorghum to the application of nutrients.

Keywords: plant nutrition; NPK; bioenergy, *Sorghum bicolor*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fases fenológicas do sorgo sacarino.	29
Figura 2. Balanço energético de culturas produtoras de biocombustíveis.	36
Figura 3. Influência das doses de fertilizantes na cultura do trigo, demonstrando os efeitos potenciais de deficiência ou toxicidade.	38
Figura 4. Dimensionamento da adubação com base na disponibilidade do nutriente no solo, visando a construção (C), manutenção (M) ou reposição da fertilidade (R).	41
Figura 5. Dados decendiais (1º, 2º e 3º decêndio) de precipitação acumulada (Precip.), evapotranspiração de referência (ET _o , método Penman-Monteith-FAO), umidade relativa média (UR%), temperaturas máxima (Temp. máx.), média (Temp. méd.) e mínima (Temp. mín.) registrados durante o período de condução do experimento. (Araras, SP, safra 2015/2016).	43
Figura 6. Balanço hídrico climatológico normal registrado durante o período de condução do experimento.	44
Figura 7. Esquema de distribuição das parcelas e das subparcelas do experimento com sorgo sacarino submetido a doses de adubação com macronutrientes primários (A); detalhe de uma unidade experimental (B).	45
Figura 8. Detalhe de uma planta de sorgo sacarino apresentando folha bandeira visível (indicada pela seta).	48
Figura 9. Gráfico da regressão ajustada da produtividade de colmos (PC, t ha ⁻¹) em função de doses de NPK de sorgo sacarino cultivado em solo de fertilidade construída (Araras, SP, safra 2015/2016).	58
Figura 10. Gráfico da regressão ajustada da BV em função de doses de NPK (A) e épocas de colheita (B); gráfico da regressão ajustada da BS em função das épocas de colheita testadas (C) (Araras, SP, safra 2015/2016).	61
Figura 11. Gráficos da regressão ajustada do número de entrenós (NE) (A) e do diâmetro de colmos (B) em função das épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).	64
Figura 12. Gráfico da regressão ajustada à MSP em função das doses de NPK (A); gráfico da regressão ajustada à MSP em função das épocas de colheita (B) (Araras, SP, safra 2015/2016).	65

Figura 13. Doença açucarada do sorgo ou <i>Ergot</i> , causada por (<i>Claviceps africana</i>). (A) exsudação de açúcares nas panículas, (B) desenvolvimento saprofítico sobre os açúcares, com aspecto de carvão sobre as panículas.....	69
Figura 14. Gráfico da regressão ajustada ao °Brix (A), ao teor de fibra (B) e ao rendimento de etanol (C) em função das épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).....	71
Figura 15. Desdobramento de médias de Pol do caldo (A) e de açúcares totais recuperáveis (ATR) (B) de sorgo sacarino cultivado em solo de fertilidade construída, através do ajuste de equações polinomiais de regressão, considerando as épocas de colheita (DAE) em cada nível de dose de NPK (DR) (Araras, SP, safra 2015/2016).	73
Figura 16. Desdobramento de médias de açúcares redutores-AR (%) (A) e de pureza do caldo (%) (B) de sorgo sacarino cultivado em solo de fertilidade construída, através do ajuste de equações polinomiais de regressão, considerando as épocas de colheita (DAE) em cada nível de dose de NPK (DR) (Araras, SP, safra 2015/2016).....	75
Figura 17. Desdobramento de médias da concentração de N (A) e P (B) de sorgo sacarino cultivado em solo de fertilidade construída, através do ajuste de equações polinomiais de regressão, considerando as épocas de colheita (DAE) em cada nível de NPK (DR) (Araras, SP, safra 2015/2016).....	80
Figura 18. Gráfico da regressão ajustada do teor de K em função de diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).....	80
Figura 19. Gráficos da regressão ajustada aos teores N (A), P (B) e K (C) no tecido vegetal em função de diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).....	83
Figura 20. Gráfico da regressão ajustada à EU (A) e à EUt (B) em função de doses crescentes de NPK (Araras, SP, safra 2015/2016).	90
Figura 21. Gráfico da regressão ajustada para eab em função de doses crescentes de NPK (A) e épocas de colheita (B) (Araras, SP, safra 2015/2016).	90
Figura 22. Localização, no Estado de São Paulo, dos municípios selecionados para a estimativa da fertilidade de áreas cultivadas com cana-de-açúcar.	94
Figura 23. Estimativa da fertilidade do solo de áreas de reforma de cana-de-açúcar a partir dos parâmetros de matéria orgânica (M.O.) (A), acidez, representada através do pH em CaCl ₂ (B), P resina (C), saturação por bases (V%) (D) e K ⁺ (E).	96
Figura 24. Preparo do solo e abertura dos sulcos de plantio.	112
Figura 25. Estaqueamento das parcelas experimentais.	112

Figura 26. Distribuição dos fertilizantes de acordo com as doses testadas, calculadas para aplicação em 6m lineares.....	113
Figura 27. Capina seletiva e vista experimental aos 25DAE.	113
Figura 28. Vista experimental aos 60DAE.....	114
Figura 29. Corte aleatório de plantas contidas em de 6 m por parcela (A) e despalhamento das plantas e seleção de plantas (B) para determinações biométricas, nutricionais e de rendimento.	114
Figura 30. Processamento das amostras em máquina forrageira para determinação de matéria seca, umidade e teores nutricionais da parte aérea.	115
Figura 31. Prensagem hidráulica para extração do caldo (A) ; filtração e clarificação do caldo para determinação dos caracteres tecnológicos (B)	115
Figura 32. Leitura do °Brix em refratômetro de bancada (A) ; leitura da pol em sacarímetro digital (B)	116
Figura 33. Determinação do PBU (peso do bolo úmido) (A) ; determinação do PBS (peso do bolo seco) (B) , para cálculo do teor de fibra.	116

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Características agroindustriais do sorgo sacarino e da cana-de-açúcar.	26
Tabela 2. Fundamentos das boas práticas para uso eficiente de fertilizantes (BPUFs), considerando as estratégias do sistema de gestão de nutrientes 4C.	37
Tabela 3. Terminologias utilizadas para definição do uso eficiente de nutrientes.	39
Tabela 4. Características químicas e granulometria de amostras da camada de 0-20 cm do LATOSSOLO Vermelho distrófico (Araras, SP, safra 2015/2016).	44
Tabela 5. Características químicas e granulometria de amostras da camada de 20-40 cm do LATOSSOLO Vermelho distrófico (Araras, SP, safra 2015/2016).	45
Tabela 6. Doses aplicadas em seus respectivos tratamentos, considerando DR 110-80-120 kg ha ⁻¹ de NPK.	47
Tabela 7. Classes de interpretação de fertilidade do solo de acordo com os valores de pH (em CaCl ₂), M.O., P e K.	54
Tabela 8. Análise de variância (ANOVA) e análise de regressão para modelo polinomial de variáveis biométricas e de produtividade de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliadas em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).	56
Tabela 9. Produtividade média de colmos (PC) de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliada em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).	57
Tabela 10. Análise econômica da aplicação de fertilizantes NPK para a cultura do sorgo sacarino cultivado em solo de fertilidade construída (Araras, SP, safra 2015/2016).	59
Tabela 11. Biomassa verde (BV) e biomassa seca (BS) de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliado em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).	60
Tabela 12. Dados climáticos quinzenais registrados durante as épocas de colheita do sorgo sacarino cultivado em solo de fertilidade construída (Araras, SP, safra 2015/2016).	62
Tabela 13. Médias de altura, número de entrenós (NE) e diâmetro de colmos de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliados em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).	63

Tabela 14. Massa seca da panícula (MSP) de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliada em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).....	65
Tabela 15. Quantidades teóricas de nutrientes na camada de 0 a 20 cm de profundidade, fornecidos ao sorgo sacarino cultivar Malibu 5010, cultivado com doses crescentes de NPK (Araras, SP, safra 2015/2016).....	66
Tabela 16. Análise de variância (ANOVA) e análise de regressão de variáveis tecnológicas de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliadas em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).....	67
Tabela 17. Médias de °Brix, teor de fibra e rendimento de etanol (RE) de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliado em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).	68
Tabela 18. Médias de Pol do caldo, ATR, AR e pureza do caldo de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliados em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).	72
Tabela 19. Análise de variância (ANOVA) e análise de regressão dos teores e acúmulo de macronutrientes primários de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliados em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).....	77
Tabela 20. Teores de macronutrientes primários em plantas de sorgo sacarino cultivadas com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliados em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).	78
Tabela 21. Acúmulo de macronutrientes primários em plantas de sorgo sacarino cultivadas com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliado em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).	82
Tabela 22. Características químicas do solo após o cultivo do sorgo sacarino com doses crescentes de NPK (Araras, SP, safra 2015/2016).	84
Tabela 23. Balanço de macronutrientes primários em solo de fertilidade construída após o cultivo de sorgo sacarino com doses crescentes de NPK (Araras, SP, safra 2015/2016). .	84
Tabela 24. Análise de variância (ANOVA) e análise de regressão da eficiência nutricional de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliada em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).	86

Tabela 25. Médias de eficiência agrônômica (EA), fisiológica (EF) e de produção (EP) de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliadas em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).....	87
Tabela 26. Médias de eficiências de uso (EU), de absorção (EAb) e de utilização (EUt) de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliadas em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).....	89
Tabela 27. Municípios selecionados para elaboração da estimativa da fertilidade de áreas cultivadas com cana-de-açúcar.....	92

LISTA DE SIGLAS

ANOVA - análise de variância
AR - açúcar redutor
ATR - açúcares totais recuperáveis
BPUFs - Boas Práticas de Utilização de Fertilizantes
Brix - sólidos solúveis
BS - biomassa seca
BV - biomassa verde
CaCl₂ - cloreto de cálcio
DAE - dias após a emergência
DMS - diferença mínima significativa
DR - dose recomendada
EA - eficiência agronômica
EAb - eficiência de absorção
EF - eficiência fisiológica
EP - eficiência de produção
ETo - evapotranspiração de referência
EU - eficiência de uso
EUt - eficiência de utilização
K - potássio
M.O. - matéria orgânica
MSP - massa seca da panícula
N - nitrogênio
NE - número de entrenós
P - fósforo
PBS - peso do bolo seco
PBU - peso do bolo úmido
PC - produtividade de colmos
Pol - porcentagem aparente de sacarose no caldo
RE - rendimento de etanol.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.2. Hipótese e objetivos	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1. A matriz energética brasileira e o mercado do bioetanol	20
2.2. O sorgo sacarino	24
2.2.1. Características botânicas e morfológicas do sorgo sacarino.....	27
2.2.2. O ciclo fenológico do sorgo sacarino	28
2.2.3. Exigências nutricionais do sorgo sacarino.....	30
2.3. Uso eficiente de fertilizantes na produção de culturas bioenergéticas	34
2.4. Solos de fertilidade construída: repensando a estratégia de adubação	39
3. MATERIAL E MÉTODOS	43
3.1. Caracterização da área experimental	43
3.2. Delineamento experimental	45
3.3. Instalação e condução do experimento	46
3.4. Avaliações biométricas e da produtividade	48
3.5. Análises tecnológicas do caldo	49
3.8. Estimativa da fertilidade do solo de áreas de reforma de cana-de-açúcar	53
3.9. Análise estatística	54
3.10. Análise econômica da adubação	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1. ANOVA das avaliações biométricas e da produtividade	56
4.1.1. Resposta agrônômica e econômica da adubação para a produtividade	57
4.1.2. Avaliações biométricas	60
4.2. Avaliação da qualidade industrial do sorgo sacarino.....	67
4.3. Acúmulo e estocagem de nutrientes	77
4.4. Eficiência nutricional do sorgo sacarino em solo de fertilidade construída	86
4.5. A fertilidade das áreas cultivadas com cana-de-açúcar	92
5. CONCLUSÕES.....	97
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
7. ANEXOS.....	112
Anexo I: Histórico experimental.....	112
Anexo II: Memórias de cálculo	117

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de mudança na matriz energética mundial, exclusivamente baseada no consumo de combustíveis fósseis, por fontes mais limpas e renováveis tem sido intensamente discutida nos últimos anos, sobretudo por sinais de exaustão de reservas de petróleo e principalmente pelos impactos negativos das mudanças climáticas (GOES; MARRA, 2008).

Projeções indicam que a demanda mundial por energia crescerá a uma taxa média anual de 1,6% até 2030, alavancada pelo crescimento do consumo dos países em desenvolvimento (IEA, 2015). Neste sentido, atender esta demanda sem comprometer questões ligadas ao aquecimento global é um grande desafio para a humanidade.

A viabilidade da agricultura energética sempre é questionada no que diz respeito à competição com a produção de alimentos. Este ponto é conflitante para a maioria dos países. Neste cenário, o Brasil apresenta potencial para despontar como maior produtor de biocombustíveis do mundo, a julgar pelas condições edafoclimáticas favoráveis para cultivo de no mínimo duas safras no ano, o que permite integrar culturas energéticas no processo produtivo (PERES et al., 2005).

O etanol da cana-de-açúcar e o biodiesel de óleos vegetais produzidos no Brasil, representam uma das melhores e mais avançadas tecnologias para a produção sustentável de biocombustíveis em larga escala no mundo. Contudo, há regiões no país com déficit de produção, por questões climáticas e de solo que impedem o estabelecimento destas culturas. Assim, numa perspectiva de sustentabilidade, se faz necessário a diversificação de matérias-primas com aptidão regional (EMIGDYO, 2010). O sorgo sacarino [*Sorghum bicolor* (L.) Moench)], um dos cinco morfotipos de *Sorghum bicolor*, é uma opção de matéria-prima com ampla adaptabilidade a condições ambientais que permite explorá-lo em locais inapropriados ao cultivo da cana-de-açúcar (MAY et al., 2013).

A viabilidade técnica de projetos bioenergéticos deve levar em consideração a questão do balanço energético, que estabelece a relação entre o total de energia contida no biocombustível e o total de energia fóssil investida em todo seu processo produtivo. Para ser positivo, o balanço energético é dependente de fatores como a produtividade da cultura e do menor consumo de fertilizantes, sobretudo os nitrogenados, que necessita de grande quantidade de energia para ser produzido (URQUIAGA; ALVES; BOODEY, 2005).

O cultivo do sorgo sacarino tem encontrado alguns desafios para se estabelecer como cultura comercial no Brasil. A restrição da base de germoplasma, a ineficácia no controle de

plantas invasoras, principalmente gramíneas, e a baixa resistência a pragas e doenças tem dificultado o processo agrícola e industrial desta matéria-prima (MAY et al., 2013).

Poucas são as informações científicas sobre a demanda nutricional do sorgo sacarino e as existentes são resultados de experimentos pouco recentes e conduzidos com variedades, sendo que atualmente os materiais genéticos disponíveis são em sua maioria híbridos que, em tese, apresentam maior produtividade e exigência nutricional (SANTOS et al., 2015).

Como relatado, o sorgo sacarino pode ser cultivado em amplas condições ambientais e edáficas, podendo ocupar áreas destinadas à renovação de canaviais, bem como ambientes tradicionais de produção de grãos. Nestes sistemas de produção altamente tecnificados, a correção da acidez e a adubação são práticas rotineiras, o que contribui significativamente para a melhoria dos atributos químicos do solo, sendo efetiva a construção da fertilidade. Quando se trata de solos de fertilidade construída, a adubação deve ser regulada em qualidade e quantidade, levando-se em conta o correto balanceamento entre os nutrientes e a economicidade de aportes adicionais de fertilizantes no sistema (RESENDE et al., 2016).

O manejo inadequado da adubação pode comprometer os processos fisiológicos das plantas, uma vez que os nutrientes exercem funções específicas no metabolismo vegetal, conseqüentemente interferindo no rendimento da cultura (KUMAR; SHROTRIA; DESHMUKH, 2008). Em sorgo sacarino, estudos evidenciaram que a adubação, sobretudo a nitrogenada, proporcionou aumento de produtividade e no conteúdo de açúcares fermentáveis e, dependendo da quantidade e época de aplicação do nutriente, o ponto ótimo de colheita pode ser alterado, em função da influência decisiva do nitrogênio (N) na fase vegetativa da planta (ALMODARES et al., 2008).

Assim como o nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) são fundamentais para a síntese e translocação de carboidratos, mas estudos sobre a influência do manejo nutricional para a produtividade e qualidade do caldo do sorgo sacarino são escassos (RAO, 2013). Em cana-de-açúcar, a aplicação de NPK em pequenas dosagens via foliar em pré-maturação, associada ao uso de maturador, apresentou um ganho de açúcares totais recuperáveis (ATR) de mais de 8,5 quilos por tonelada de cana (CRUSCIOL, 2017). Neste contexto, o conhecimento da demanda de nutrientes de culturas sacaríneas é fundamental para uma reposição adequada, sobretudo em solos de fertilidade construída, para que não haja falta e nem excessos de nutrientes.

1.2. Hipótese e objetivos

Para responder o questionamento sobre qual seria o impacto do dimensionamento inadequado da adubação em solos de alta fertilidade para culturas bioenergéticas, esta dissertação teve por objetivo testar a hipótese de que a prática da adubação em solo de fertilidade construída influencia o crescimento e a maturação do sorgo sacarino, de forma a promover variações no ponto ótimo de colheita, que está relacionado à produtividade e qualidade industrial máxima da cultura.

Os objetivos específicos consistiram em:

- Analisar a viabilidade econômica da adubação NPK para o sorgo sacarino cultivado em solo de fertilidade construída;
- Avaliar os efeitos de doses de nutrientes nas características biométricas e de produtividade, assim como nas características tecnológicas do caldo do sorgo sacarino, em diferentes épocas de colheita;
- Quantificar o conteúdo e a exportação de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) pela cultura por ocasião da aplicação de diferentes doses de fertilizantes;
- Determinar a eficiência nutricional do genótipo de sorgo sacarino cultivado em solo de fertilidade construída;
- Levantar informações de fertilidade do solo de áreas de reforma de cana-de-açúcar, examinar sua aderência ao conceito de “fertilidade construída” e discutir a viabilidade de cultivo de sorgo sacarino com doses reduzidas de macronutrientes nestas áreas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A matriz energética brasileira e o mercado do bioetanol

Os números do Ministério de Minas e Energia-MME (2018) são expressivos: pode-se dizer, indiscutivelmente, que o Brasil possui a matriz energética mais limpa do mundo, com uma participação das fontes renováveis de 43,2%. Na matriz mundial, esta representatividade não ultrapassa os 14%. Do percentual de uso de fontes alternativas ao petróleo no Brasil, 25,4%

são de contribuição da bioenergia e, deste valor, 17,4% foram originados de produtos derivados da cana-de-açúcar (bioetanol e bagaço).

O bioetanol é produzido a partir da fermentação alcoólica mediada por leveduras e bactérias que atuam sobre a fração biodegradável de materiais que possuam quantidades significativas de açúcares ou constituintes que possam ser convertidos em açúcares, cujo processo é comumente denominado de etanol de primeira geração (1G) (PACHECO, 2011). Culturas agrícolas que apresentam crescimento rápido e de colheita anual, com quantidades expressivas de açúcares diretamente fermentáveis (amiláceas ou sacarinas) são as mais interessantes para a produção de bioetanol, como por exemplo os cereais (trigo, milho, centeio, dentre outros), a beterraba açucareira, a cana-de-açúcar, o sorgo sacarino e os tubérculos de mandioca e girassol batateiro (CARVALHO; FERREIRA, 2014). Em regiões com clima desfavorável e falta de extensão territorial para cultivo, torna-se necessário investir no desenvolvimento de tecnologias de segunda geração de produção, em que o etanol pode ser produzido a partir de lignocelulose, presente em resíduos de origem vegetal, técnica então denominada de etanol de segunda geração (2G) (PACHECO, 2011).

Segundo estatísticas de 2017, Estados Unidos (EUA) e Brasil são os maiores produtores de bioetanol, com 58% (60 bilhões de litros) e 25% (27 bilhões de litros) da produção mundial (RENEWABLE FUELS ASSOCIATION, 2017), respectivamente. Outros países produtores representam apenas 17% da produção mundial, ainda que China e Índia, nos últimos anos, tenham aumentado investimentos em pesquisas sobre combustível renovável (RENEWABLE FUELS ASSOCIATION, 2017). Nos Estados Unidos, a produção de etanol envolve uma série de debates sobre desabastecimento alimentar, pois é fabricado a partir do milho, fortemente subsidiado pelo governo americano, e que compete diretamente com a produção de alimentos.

Deste modo, pode-se considerar o Brasil como país estratégico para o abastecimento mundial de etanol, a julgar pelas condições edafoclimáticas favoráveis para cultivo de, no mínimo, duas safras no ano, o que permite integrar culturas energéticas no processo produtivo (PERES et al., 2005).

Embora tenha um reconhecimento mundial de sucesso como combustível renovável, o bioetanol tem histórico de produção no Brasil marcado por altos e baixos. Na década de 70, devido à crise mundial de petróleo, o governo brasileiro lançou o Proálcool (Programa Nacional do Alcool) para estímulo da produção de álcool a fim de diminuir as importações brasileiras de petróleo, que chegou a ter os preços quadruplicados nesta época (ALMEIDA; LONGHI; SANTOS, 2017). Na primeira fase do programa, de 1975 a 1979, foi instituída a mistura de

24% de etanol na gasolina. De 1979 a 1985, o programa passou a promover o uso do álcool como combustível principal, aumentando a frota de veículos movidos exclusivamente a etanol. A partir de meados da década de 80, devido à baixa nos preços do barril de petróleo, o álcool foi perdendo competitividade frente à gasolina. Somando-se a isso, houve aumento considerável do preço do açúcar no mercado internacional, fazendo com que as usinas optassem por produzir açúcar a álcool. O país encontrava-se com altos índices de inflação e dívida externa, ocorrendo corte de subsídios para o setor sucroenergético. Com a abertura econômica no início dos anos 90, as montadoras passaram a importar veículos movidos a gasolina, estagnando a produção de etanol e extinguindo o Proálcool (GOLDEMBERG, 2009; KOHLHEPP, 2010; ALMEIDA; LONGHI; SANTOS, 2017).

Em 2003, frente a uma nova crise nos preços do petróleo e expectativas de ocorrer uma corrida internacional por combustíveis limpos para atendimento do Protocolo de Quioto, as indústrias automobilísticas inovaram e desenvolveram motores denominados *flex fuel*. Com a criação deste sistema, os veículos passaram a funcionar tanto com gasolina quanto com etanol, permitindo ao consumidor avaliar o combustível mais vantajoso quanto ao preço e ao desempenho (MELO; SAMPAIO, 2016; ALMEIDA; LONGHI; SANTOS, 2017). A partir desse evento, o setor sucroenergético passou a investir maciçamente na maximização da capacidade produtiva, onde o número de novas usinas saltou de 8, em 2005, para 34, em 2008. Com a crise internacional, que afetou os EUA e a comunidade europeia com maior intensidade, as expectativas de um cenário de crescimento foram frustradas. O setor sucroenergético foi drasticamente afetado pela restrição dos investimentos, o que elevou o grau de endividamento das usinas, sendo a situação agravada pelo fato de que Estados Unidos e a União Europeia, através de legislações específicas e de barreiras tarifárias e não tarifárias, estimularam a produção interna de biocombustíveis e barraram a entrada do bioetanol brasileiro em seus mercados, diminuindo as projeções de aumento das exportações (CRUZ; INÁCIO; MORAES, 2013; DELGADO; SOUSA; ROITMAN, 2017).

Internamente, as políticas governamentais para a estabilidade da inflação, através do congelamento do preço da gasolina, contribuíram decisivamente para a perda de competitividade do etanol hidratado. A partir de 2011, a relação entre os preços do etanol e da gasolina ultrapassou os 70%, situação considerada desvantajosa pelo consumidor (COSTA; BURNQUIST, 2016; DELGADO; SOUSA; ROITMAN, 2017). Esta relação de paridade de preços foi comumente estabelecida porque o poder calorífico do etanol – definido como a quantidade de energia interna contida no combustível – é cerca de 30% menor ao da gasolina.

No entanto, o desempenho do veículo não depende apenas desta característica, e sim de mais variáveis como a octanagem, a eficiência do motor, o ano de fabricação, dentre outras. A relação de preços também não considera que na gasolina há mistura de 27% de etanol anidro e, conseqüentemente, o poder calorífico do combustível final é reduzido (COSTA; BURNQUIST, 2016; DELGADO; SOUSA; ROITMAN, 2017).

Recentemente, dois eventos podem ser considerados como um divisor de águas para a produção de etanol no Brasil e no mundo. O primeiro foi o Acordo de Paris, firmado na 21ª Conferência das Partes (COP 21) em 2015, e ratificado por 155 países, no qual uma das premissas é manter o aquecimento global abaixo de 2°C, limitando o aumento da temperatura a 1,5 °C, com base nos níveis pré-industriais (UNICA, 2015; DELGADO; SOUSA; ROITMAN, 2017). O acordo abriu caminho para a adoção do etanol e de outras bioenergias na matriz energética mundial, sendo a proposta brasileira considerada uma das mais desafiadoras para mitigação dos gases de efeito estufa (GEEs): até 2030, o país prevê que os biocombustíveis representem 18% da matriz energética, conseguindo mitigar cerca de 37% das suas emissões de GEEs, em relação aos níveis de 2005, com possibilidade de aumentar esta redução para 43%. Para tanto, o Brasil terá que produzir 50 bilhões de litros de etanol, o que representa praticamente duplicar a produção atual (UNICA, 2015; MME, 2018). O segundo evento, que tem causado certa preocupação ao setor de biocombustíveis, é o avanço da tecnologia do carro elétrico, levando nações como China, França e Reino Unido a assumirem o compromisso de banir a fabricação de carros à combustão até 2030 (REIS; SILVA, 2017). Os carros elétricos são veículos que necessitam de pontos com energia elétrica para abastecer e possuem níveis nulos de emissão de poluentes para a atmosfera. São apontados por vários países como a solução para reduzir a emissão de GEEs pelo setor de transportes, sem questionamento relevante sobre a eficiência e a sustentabilidade das fontes geradoras da energia elétrica para movimentar os veículos (REIS; SILVA, 2017). Informações da Agência Internacional de Energia (IEA, 2015) revelaram que 60% da energia elétrica mundial é produzida a partir de fontes de origem fóssil e que 18% tem origem da tecnologia nuclear.

Admite-se que se a energia elétrica que alimentará os veículos for “suja”, como é na maioria dos países europeus, o modelo poderá resultar em impactos ambientais mais negativos do que aqueles provocados pelos veículos movidos a etanol no Brasil (VEDANA, 2018). Uma alternativa que está sendo desenvolvida pelas montadoras é a do veículo elétrico híbrido, cujas baterias são alimentadas por uma célula de combustível que usa o bioetanol, que converte energia química em energia elétrica, aumentando inclusive a autonomia em viagens de longa

distância. Desta forma, o etanol, outrora ameaçado, volta a receber o reconhecimento que lhe é merecido, como biocombustível eficiente para combater o aquecimento global (ABVE, 2018).

Para atender o compromisso firmado na COP 21, o governo brasileiro lançou, em dezembro de 2016, o Programa RenovaBio, com objetivo de estimular a produção de biocombustíveis e de definir regulamentações para o setor, com regras claras e mecanismos que garantam confiabilidade necessária para atrair investidores. Além disso, o programa tem por premissa impulsionar o desenvolvimento tecnológico para aumento da competitividade dos biocombustíveis, além de processos de certificação da produção que permitam a negociação de créditos de descarbonização (MME, 2018).

Com a regulamentação do RenovaBio, espera-se que haja uma demanda crescente por biocombustíveis no país nos próximos anos, sobretudo pelo etanol, não especificamente daquele derivado da cana-de-açúcar. Há expectativas de crescimento no número de usinas denominadas *flex*, que utilizam, além da cana-de-açúcar, o milho como matéria-prima para produção do etanol, principalmente na entressafra da cana-de-açúcar (entre dezembro e março). Este empreendimento tem se mostrado interessante para região Centro-Oeste devido ao aumento expressivo da produção de milho e aos preços baixos (DELGADO; SOUSA; ROITMAN, 2017).

Este fato, somado a problemática de regiões com déficit de produção de etanol, por questões climáticas e de solo que impedem o estabelecimento da cana-de-açúcar e do milho, abre espaço para o cultivo de outras espécies, em especial do sorgo sacarino. A cultura possui grande potencial devido ao menor requerimento de insumos, por apresentar maior produção de etanol por área, ciclo curto (60-120 dias) e, sobretudo, por sua capacidade de adaptação a condições marginalizadas de cultivo, como estresse hídrico, acidez, salinidade, alcalinidade, dentre outros (EMIGDYO, 2010; FERNANDES et al., 2014, REGASSA; WORTMANN, 2014).

2.2. O Sorgo Sacarino

O sorgo é o quinto cereal de maior importância cultivado no mundo, depois do trigo, arroz, milho e cevada, sendo componente da alimentação de mais de 500 milhões de pessoas, principalmente nos países africanos e asiáticos, e uma das mais importantes culturas para as

regiões áridas e semiáridas do mundo (YANG et al., 2018). Nos Estados Unidos, Austrália e Brasil, é um importante componente da nutrição animal (QUEIRÓZ, 2014).

De modo mais expressivo, esta cultura é reconhecida por sua contribuição à produção de grãos. Contudo, *Sorghum bicolor* pode ser intitulado como uma espécie multifuncional, produzindo, além de grãos, etanol a partir do sorgo sacarino, forragem e pastagem (sorgo forrageiro) e etanol de 2ª geração e eletricidade (sorgo biomassa). Estes morfotipos de sorgo são de cultivo anual e diferem pelo porte da planta, pela panícula (aberta ou compacta) e pelo direcionamento dos fotoassimilados nas estruturas de reserva (grãos ou colmos) (FORNASIERI FILHO, 2009).

Nos últimos anos, pesquisas com sorgo sacarino foram retomadas em função das exigências ambientais para a mitigação de emissão de gases de efeito estufa, o que possibilitará a expansão da cultura no Brasil, uma vez que constitui matéria-prima para a produção de etanol. Outros países como a China, Índia, União Europeia, EUA e Austrália também têm investido no sorgo sacarino como alternativa real para produção e uso do etanol de 1ª e 2ª geração, reduzindo a dependência de energia de origem fóssil (MARCOCCIA, 2007; YANG et al., 2018).

Os açúcares fermentáveis do sorgo sacarino têm potencial para produzir até 8.000 litros de etanol por hectare (REIS, 2014). Isso representaria rendimento cerca de duas vezes o potencial de produção de etanol a partir de grãos de milho ou ainda 30 % maior do que a média da cana-de-açúcar brasileira, que é de aproximadamente 6.000 L ha⁻¹. Na China, o sorgo experimentalmente apresentou resultados de 50 a 60 t ha⁻¹ de matéria verde e de 6.000 a 7.000 L ha⁻¹ de etanol com o aproveitamento dos colmos e dos grãos (WANG et al., 2007; YANG et al., 2018).

Rezende; Richardson (2017) elaboraram estudo sobre a viabilidade econômica do cultivo do sorgo sacarino em unidades sucroenergéticas do Estado de São Paulo. Comparando o custo de produção de etanol de sorgo sacarino produzido na China (US\$ 0,29 L⁻¹) e no Brasil a partir da cana-de-açúcar (US\$ 0,22 L⁻¹), os autores mostraram que, mesmo a China produzindo etanol a partir da técnica de segunda geração, mais onerosa, os custos não foram tão díspares aos do Brasil, o que sugere a necessidade de esforços do setor para melhoria da competitividade brasileira. O sorgo sacarino seria uma alternativa para as unidades sucroenergéticas, uma vez que é pouco exigente em insumos e pode ser produzido na entressafra, diluindo os custos fixos em função de maior produção de etanol. O cultivo de sorgo em 20% das áreas de cultivo da cana-de-açúcar poderia aumentar o lucro líquido das usinas em R\$ 10.000 ha⁻¹.

O sorgo sacarino é uma alternativa viável para aumentar a quantidade produzida de etanol anualmente no Brasil, podendo ofertar cerca de 50% a mais deste biocombustível no mercado (KLINK, 2010). Não há a necessidade de mudanças estruturais e logísticas do parque industrial e operacional das usinas, pelo fato desta cultura permitir que sua colheita seja realizada com os mesmos implementos utilizados para a cana-de-açúcar. A época ideal de colheita ocorre justamente na entressafra de cana-de-açúcar, quando a produção de etanol por hectare é máxima no sorgo e da cana-de-açúcar ainda está muito abaixo do seu potencial máximo (MAY et al., 2013). A comparação das características agroindustriais da cana-de-açúcar e do sorgo sacarino (Tabela 1) demonstra que, embora o sorgo apresente algumas características inferiores aos da cana-de-açúcar, deve-se considerar que a espécie tem um ciclo menor que possibilita o seu cultivo em duas safras no ano, com menores requerimentos de fertilizantes (GOMES, 2014).

Tabela 1. Características agroindustriais do sorgo sacarino e da cana-de-açúcar.

Características	Unidade	Sorgo Sacarino	Cana-de-açúcar
Ciclo vegetativo	meses	3,5 a 4	9 a 18
Cultivos	nº ano ⁻¹	dois	um
Produtividade	t ha ⁻¹	48 a 60	80-85
°Brix	%	15-19	18-25
Açúcares Redutores	%	6	3
Açúcares Redutores Totais	%	12-17	15-24
Sacarose	%	8-13	14-22
Produção de etanol	L ha ⁻¹	3000-3600	7000-7500
Fibras	%	12-20	10-15

Fonte: adaptado de Gomes (2014).

O sorgo sacarino pode ser cultivado em diversas condições edafoclimáticas, mas ainda encontra dificuldades para estabelecimento na agricultura brasileira, devido às lacunas de conhecimento sobre práticas de manejo, resultando em rendimentos de etanol dificilmente superiores a 3.500 L ha⁻¹, muito aquém do potencial da cultura (ARAÚJO et al., 2012). Informações insuficientes sobre nutrição e adubação, controle de plantas daninhas e resistência às pragas e doenças e a quantidade restrita de cultivares de alto potencial genético são problemas comuns. O despreparo das equipes operacionais e gerenciais do setor sucroenergético sobre aspectos ligados as condições de colheita também é relevante, uma vez que o sorgo apresenta o período útil de industrialização (PUI) muito curto para algumas cultivares (10 a 15 dias), o que exige maior velocidade na tomada de decisões para não perder

o ponto ideal de colheita. Estes são alguns dos muitos desafios que precisam ser vencidos para o uso eficiente da tecnologia de cultivo do sorgo sacarino (MAY et al., 2013).

2.2.1. Características botânicas e morfológicas do sorgo sacarino

O sorgo é uma planta da família Poaceae, do gênero *Sorghum*, e da espécie *Sorghum bicolor* L. Moench. Apresenta metabolismo C4, ou seja, de alta taxa fotossintética (30 a 100 mg CO₂ cm⁻² h⁻¹) e pequena taxa de fotorrespiração, o que lhe confere grande capacidade de produção de fitomassa, principalmente nos morfotipos sacarino e forrageiro. O sorgo sacarino apresenta como característica o porte alto, podendo atingir mais de três metros de altura, baixa produção de sementes e colmos ricos em açúcares, com valores de °Brix que variam de 11 a 18 (DUTRA et al., 2013; REGASSA; WORTMANN, 2014). A temperatura ótima para a maioria dos materiais genéticos, que normalmente apresentam sensibilidade ao fotoperíodo, situa-se entre 16 e 32°C (JARDINE; DISPATO; PERES, 2009; REGASSA; WORTMANN, 2014).

O sistema radicular do sorgo é do tipo fasciculado, composto por raízes que possuem sílica na endoderme, grande quantidade de pelos absorventes e altos índices de lignificação no periciclo, características que garantem maior tolerância ao déficit hídrico (COWLEY; SMITH, 1972; PINHO; FIORINI; SANTOS, 2014). Magalhães; Durães; Rodrigues (2003) explicam que os mecanismos de resistência ao estresse hídrico do sorgo estão relacionados ao sistema radicular profundo e ramificado (estratégia de escape) e a mecanismos específicos de tolerância, uma vez que a planta reduz o metabolismo e murcha, recuperando-se em eventos de disponibilidade hídrica. Nas folhas, há depósitos de cera que conferem a planta de sorgo menor perda de água por evapotranspiração.

Para produzir um kg de matéria seca, o sorgo necessita de 300 litros de água, enquanto o milho, trigo e cana-de-açúcar necessitam de 370, 500 e 600 litros de água por kg de matéria seca, respectivamente (GOMES, 2014). A disponibilidade adequada de água durante o ciclo é essencial para um bom rendimento de colmos e do caldo do sorgo sacarino (VERMERRIS et al., 2011). Além da eficiência no uso da água, o sorgo possui tolerância à acidez, ao excesso de alumínio, salinidade, alcalinidade e baixa fertilidade do solo (MAGALHÃES; DURÃES; RODRIGUES, 2003; REGASSA; WORTMANN, 2014).

Oliveira et al. (2013), analisando o desempenho de 10 cultivares de sorgo sacarino em dois níveis de saturação por alumínio (0% e 40%) em condições de campo, observaram que os

genótipos responderam de forma diferenciada aos ambientes com ou sem presença de Al, sobretudo quanto às características de número de dias para atingir o florescimento, °Brix e produção de massa verde. O Al fitóxico reduziu drasticamente o porte e a produção de massa verde, ampliando o ciclo de alguns dos cultivares estudados.

O caule do sorgo sacarino é dividido em nós e entrenós, caracterizado por apresentar colmos doces e suculentos como os da cana-de-açúcar. Também apresenta vários caules (afilhamento) por planta, onde cada um apresenta uma inflorescência terminal do tipo paniculado, que é aberta e produz poucos grãos (DINIZ, 2010). Os colmos do sorgo sacarino são ricos em sacarose, glicose e frutose. Essa composição facilita o processo de fermentação, enquanto outras matérias-primas como milho, batata-doce, batata, mandioca e o grão de sorgo, por apresentarem maiores teores de amido, podem onerar os custos de produção do etanol. Isto se deve ao fato de que é necessária a quebra do amido em glicose para ocorrer o processo fermentativo, sendo que esta etapa adicional encarece o processo produtivo (WU et al., 2010; MAY et al., 2013).

2.2.2. O ciclo fenológico do sorgo sacarino

Atender as necessidades das plantas no momento fisiológico correto é fundamental para bons rendimentos (CÂMARA, 2006; DINIZ, 2010). A germinação, a emergência e o crescimento inicial da plântula são fases importantes e delicadas para o estabelecimento do sorgo sacarino, devido à sua semente ser pequena e de pouca reserva. A ocorrência mais rápida possível destas etapas garantirá o sucesso do estande ideal de plantas e, conseqüentemente, um controle eficiente das plantas daninhas até a fase de indução floral, para que a produtividade não seja comprometida significativamente (DINIZ, 2010). No entanto, ainda são escassas informações a respeito de como os estádios iniciais podem afetar o rendimento desta cultura (JARDINE; DISPATO; PERES, 2009).

Após as plantas de sorgo sacarino passarem pelo estágio vegetativo, quando ainda são insensíveis ao fotoperíodo, inicia-se a fase indutiva ao florescimento. Neste momento, ocorrendo fotoperíodos indutivos, as plantas de sorgo sofrem mudanças fisiológicas em seu meristema apical, caracterizada pela iniciação do meristema floral (KARANDE; VARSHNEYA; MAIDU, 1996).

Sena et al. (2013) estudaram a distribuição e acumulação de açúcares nos entrenós de dois genótipos de sorgo sacarino (MN 1500 e IS 26833), considerados sensíveis ao fotoperíodo, em diferentes épocas de colheita. Os autores verificaram que, para as condições de Sete Lagoas (MG), os genótipos não apresentaram sensibilidade ao fotoperíodo e que o corte do sorgo deve ser efetuado o mais rente possível do solo, pois nos entrenós da base foi notada uma quantidade significativa de caldo. Foi observado que a indução floral do sorgo sacarino ocorreu quando o comprimento do dia foi menor do que 12 h e 20 min.

De acordo com EMBRAPA (2011), o sorgo possui três estádios de crescimento (EC), em que EC1 vai do início da emergência até a iniciação das panículas, EC2 do final do EC1 até o florescimento, e EC3 do florescimento à maturação fisiológica da planta. Nas três fases, a fotossíntese, a distribuição de fotoassimilados e a expansão e divisão celulares não devem ser comprometidas, visando uma produtividade ideal para a cultura. A Figura 1 apresenta as fases fenológicas do sorgo sacarino em função dos dias após a emergência das plantas, considerando um cultivar de ciclo médio de desenvolvimento (aproximadamente 120 dias).

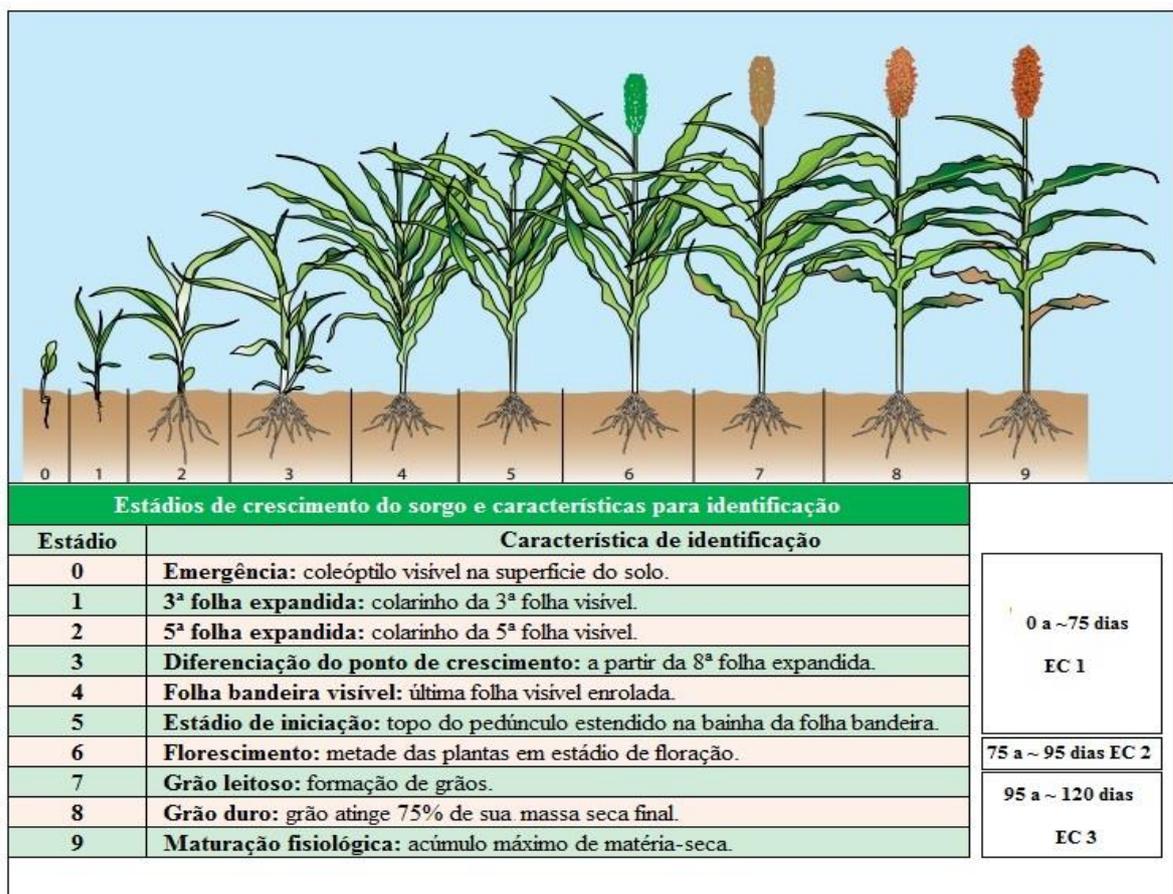


Figura 1. Fases fenológicas do sorgo sacarino.

Fonte: adaptado de EMBRAPA (2011) e de Ciampitti (2014).

A produção de grãos é um aspecto de menor importância para os tipos de sorgo sacarino e forrageiro. Os processos fisiológicos mais importantes são aqueles que proporcionam maior produção de biomassa total e, no caso do sorgo sacarino, aqueles que resultem em maior acúmulo e armazenamento de açúcares nos colmos. Após atingir a floração completa, a planta inicia o processo de acúmulo de açúcares até o estágio de maturação, sendo observado que o estágio compreendido entre o final de grãos leitosos e o de grãos maduros é o mais adequado à utilização dos colmos para o processamento industrial (BORGONOVÍ et al., 1982).

O manejo nutricional, principalmente a adubação com macronutrientes, influencia decisivamente no crescimento e no desenvolvimento das culturas. Wamser; Mundstock (2007), estudando os estádios fenológicos mais críticos para a suplementação nitrogenada (70 e 140 kg ha⁻¹ de N) em cevada, em experimentos de campo nos anos agrícolas de 2000/2001, constataram que os estádios mais críticos corresponderam ao início e ao final do afilhamento, nos quais a adubação inadequada de N pode comprometer a formação de espiguetas e, conseqüentemente, o rendimento dos grãos.

Hammad et al. (2013), estudando os efeitos da aplicação de N em diferentes épocas sobre a fenologia do milho, em condições de campo e de clima semiárido do Paquistão, observaram que o tratamento com 1/3 de N na fase V2, 1/3 de N no estágio V16 e 1/3 de N no estágio R1, na dose de 250 kg N ha⁻¹, propiciou maior rendimento (8,38 t ha⁻¹ de grãos), sendo que as plantas de milho acumularam 51 dias para atingirem a fase de pendramento e 102 dias para a fase de maturação.

2.2.3. Exigências nutricionais do sorgo sacarino

É comum observar na literatura técnica ou científica a afirmativa de que o sorgo é uma planta pouco exigente quanto à fertilidade do solo. No entanto, o sorgo sacarino, por ser cultivado no verão com boa disponibilidade hídrica, época de maior radiação solar e temperatura, pode expressar maior potencial produtivo e, por isso, exigir um maior aporte nutricional (MAY et al., 2013).

Nas recomendações de adubação, deve-se levar em conta que existe uma variação considerável devido as diferentes condições edafoclimáticas e ao material genético utilizado entre as regiões produtoras. Conhecer essas condições é imprescindível para se buscar maiores

produtividades e, conseqüentemente, maior lucratividade da atividade agrícola, uma vez que possibilitam o manejo racional da adubação (COELHO et al., 2002; RESENDE et al., 2016).

Os nutrientes mais exigidos pela maioria das culturas, não necessariamente nesta ordem, são o nitrogênio (N), o potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P) e enxofre (S), sendo que a resposta das culturas à adubação é mais dependente da interação entre estes elementos do que de seus efeitos isolados (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

Quanto à exportação dos nutrientes pelo sorgo, o P e o N são quase totalmente translocados para os grãos, seguidos pelo magnésio (Mg), K e cálcio (Ca). Este fato é um indicativo de que a incorporação dos restos culturais do sorgo devolve ao solo parte dos nutrientes, principalmente K, Ca e Mg contidos na palhada. No entanto, mesmo que a palhada seja mantida na área de produção e, em virtude das grandes quantidades que são exportadas pelos grãos, há a necessidade de reposição desses nutrientes para os cultivos posteriores (MAY et al., 2013).

Soares et al. (2014) estudaram o crescimento e o acúmulo de macronutrientes de quatro híbridos de sorgo sacarino (CVSW80007, CVSW80147, CVSW82028 e CVSW82158). O experimento foi conduzido em área de renovação de cana-de-açúcar no município de Uchoa-SP, coletando-se as plantas em intervalos de 15 dias a partir do décimo dia após a emergência (DAE). Os autores observaram que a sequência decrescente de exportação de nutrientes, considerando colmos e grãos, foi $K > N > Ca > Mg > P > S$ para as cultivares CVSW80007, CVSW80147 e CVSW82158 e $K > N > Mg > Ca > P > S$ para CVSW82028. Pivetta (2014) estabeleceu as curvas de acúmulo de matéria seca e de nutrientes e verificou a qualidade tecnológica de híbridos de sorgo sacarino, na região de Selvíria-MS. Foram utilizados os híbridos Advanta 81981 e CV 147, com amostragens de folhas, colmos e panículas realizadas a cada 15 dias após a emergência das plantas. O autor constatou que estes dois cultivares acumularam matéria seca durante todo o ciclo, ocorrendo o máximo acúmulo de nutrientes no período de florescimento das plantas. A ordem decrescente de exportação de nutrientes foi $K > N > Mg > Ca > P > S > Fe > Mn > Zn > Cu$. Além disso, estes híbridos modernos de sorgo sacarino acumulam o dobro de P e de K na parte aérea, em relação às antigas variedades.

Estes e outros trabalhos corroboram o fato de que o sorgo sacarino acumula e exige K em maior quantidade, seguido pelo N e por menores quantidades de P. Santos et al. (2013) afirmaram que, para se atingir produtividades que viabilizem a produção de biocombustíveis a partir de biomassa vegetal, a cultura do sorgo sacarino necessitaria em torno de 280, 80 e 420 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente.

O K tem o papel fundamental na síntese de proteínas, carboidratos, açúcares, ácidos orgânicos, entre outras, estando todas essas características relacionadas com a qualidade dos produtos agrícolas. Este elemento interage com quase todos os outros nutrientes essenciais à planta. Ele é importante para a ativação enzimática, uso eficiente da água, fotossíntese, transporte de açúcares, água e movimento de nutrientes, síntese de proteínas, formação de amido e qualidade da cultura (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; FERNANDES, 2006). A deficiência de K, em cana-de-açúcar, diminui a produção e translocação de carboidratos para os colmos, além de aumentar a taxa de respiração da planta, influenciando negativamente na quantidade de açúcares armazenados. Consequentemente, pode ocorrer atraso na maturação e no crescimento dos colmos, tornando-os frágeis e suscetíveis ao acamamento (RODRIGUES, 1995; MAZONI; BURJAILI; PAGOTTO, 2013). No outro extremo, o excesso de K pode comprometer negativamente a absorção de elementos como Ca, Mg e Fe e provocar estresse por aumento da salinidade, o que diminui a riqueza da cana-de-açúcar em açúcares e a produtividade (MAZONI; BURJAILI; PAGOTTO, 2013).

O N é um macronutriente primário que tem o maior e mais rápido efeito sobre o crescimento vegetal, sendo exigido pelas culturas em geral em maior quantidade do que qualquer outro macronutriente (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; FERNANDES, 2006). Suas funções básicas são favorecer o crescimento, promover o desenvolvimento do sistema radicular, melhorando a absorção dos outros nutrientes presentes na solução do solo, e participar da composição das proteínas das plantas (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; FERNANDES, 2006). Em cana-de-açúcar, a adubação nitrogenada em altas doses pode conduzir a planta a um crescimento vegetativo excessivo, atrasando a maturação e prejudicando a qualidade da matéria-prima pela diminuição do teor de sacarose dos colmos (RODRIGUES, 1995; MAZONI; BURJAILI; PAGOTTO, 2013). Por outro lado, a deficiência de N também tem a influência direta sobre a qualidade industrial da cana-de-açúcar, aumentando o teor de fibra e diminuindo a concentração de sacarose nos colmos, que passa a ser acumulada nas folhas (ORLANDO FILHO, 1994; MAZONI; BURJAILI; PAGOTTO, 2013).

O P desempenha função-chave na fotossíntese, no metabolismo de açúcares, no armazenamento e transferência de energia, na divisão celular, no alargamento das células, na constituição dos fosfolipídeos da membrana plasmática, na transferência da informação genética, na formação inicial e no desenvolvimento da raiz e no crescimento da planta. Além disso, afeta a qualidade das frutas, dos vegetais e dos grãos e é vital para a formação da semente. É um macronutriente que aumenta a eficiência de utilização da água e de todos os outros

nutrientes, sendo também responsável pela antecipação da maturação (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; FERNANDES, 2006).

Além da sua essencialidade para o desenvolvimento vegetal, o P exerce uma função muito importante no processo industrial da cana-de-açúcar. Cesar et al. (1987) explicaram que a composição do caldo da cana-de-açúcar é um dos fatores que afetam as diversas operações unitárias do processamento industrial, sobretudo na purificação do caldo e na fermentação alcoólica. Dentre todas as análises físico-químicas, a análise quantitativa da concentração de P é de extrema importância, uma vez que este elemento influencia o processo de clarificação para a produção de açúcar, bem como na fermentação alcoólica, seja na multiplicação ou no crescimento celular, aumentando a eficiência e o rendimento do processo e a qualidade do produto final.

Deve-se considerar que ocorrem interações entre os nutrientes que podem favorecer ou desfavorecer sua absorção pelas culturas. O N, quando disponibilizado na forma amoniacal e junto com o P na faixa de adubação, atua direta e indiretamente no desenvolvimento do sistema radicular das plantas, uma vez que promove o aumento da eficiência da adubação fosfatada devido ao abaixamento do pH na superfície das raízes. Quando se associa ao K, na forma de KCl, este efeito é potencializado, pelo fato de o íon cloreto diminuir a taxa de nitrificação e manter o N do solo na forma amoniacal, evitando-se perdas por lixiviação do NO_3^- . Além disso, o K está envolvido no transporte ascendente do nitrato das raízes para a parte aérea e descendente do malato para as raízes, assim como na síntese proteica (BLAIR; MAMMARIL; MILLER, 1971; YAMADA, 2002).

Melo et al. (2014) quantificaram, em casa-de-vegetação, o efeito de deficiências nutricionais nas características fisiológicas de plantas adultas de sorgo sacarino. Os tratamentos consistiram de soluções nutritivas com ausência de um dos nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Mn, Fe, Cu e Zn), além de uma testemunha com solução nutritiva completa. Cinquenta dias após o transplante das plantas de sorgo nas soluções, foi avaliado o CO_2 consumido, a concentração de CO_2 no mesofilo foliar, a taxa de fotossíntese, o aquecimento metabólico foliar (variação na pressão de vapor, transpiração, condutância estomática) e o uso da água. A taxa fotossintética e a eficiência no uso da água foram afetadas pela deficiência de todos os nutrientes, exceto de Zn e de Mn. A transpiração não foi afetada pela ausência de Zn, Mn e S. A ausência dos demais nutrientes afetou o desempenho fisiológico das plantas adultas de sorgo sacarino.

Em relação aos micronutrientes, poucas pesquisas apontam doses e padrões de absorção em sorgo sacarino (PIVETTA, 2014). Nos trabalhos de Coelho (2012), foi constatado que a cultura do sorgo possui alta sensibilidade à deficiência de Fe e de Zn, sendo este último elemento o micronutriente mais limitante à produção do sorgo no Brasil.

Pivetta (2014) constatou que os híbridos Advanta 81981 e CV 147, cultivados em LATOSSOLO Vermelho distrófico textura argilosa, apresentaram acúmulo de micronutrientes na parte aérea na seguinte ordem: Fe>Mn>Zn>Cu. Os valores foram mais expressivos no período compreendido entre o florescimento e início de formação dos grãos. O autor verificou que a ordem de acúmulo de micronutrientes foi semelhante à encontrada por Franco (2011) para o sorgo forrageiro, demonstrando que as características de requerimento nutricional foram iguais entre os morfotipos de sorgo, porém em quantidades diferentes.

Desta maneira, May et al. (2013) enfatizaram que o sorgo sacarino é uma cultura exigente em fertilidade do solo para atingir altas produtividades de biomassa para produção de etanol. Com isso, conhecer a demanda nutricional e o potencial produtivo das cultivares disponíveis é essencial para realizar o manejo da adubação de forma mais eficiente do ponto de vista técnico, econômico e ambiental.

2.3. Uso eficiente de fertilizantes na produção de culturas bioenergéticas

A viabilidade técnica de projetos bioenergéticos deve levar em consideração a questão do balanço energético, que estabelece a relação entre o total de energia contida no biocombustível e o total de energia fóssil investida em todo seu processo produtivo. Para ser positivo, o balanço energético é dependente de fatores como a produtividade da cultura e do menor consumo de fertilizantes, sobretudo os nitrogenados, que necessita de grande quantidade de energia para ser produzido (URQUIAGA; ALVES; BOODEY, 2005).

O manejo eficiente da adubação no processo produtivo de biocombustíveis é uma premissa fundamental. Além da questão energética, o uso inadequado de fertilizantes nitrogenados pode ter como consequência a emissão do óxido nitroso (N₂O), gás de efeito estufa 300 vezes mais prejudicial à camada de ozônio do que o CO₂. Em 2008, o cientista holandês Paul Crutzen, prêmio Nobel de Química de 1995, e seus colaboradores publicaram um artigo na *Atmospheric Chemistry and Physics* afirmando, através de modelagens matemáticas, que se o fator de emissão de óxido nitroso durante o cultivo da cana-de-açúcar ultrapassar 5%, os

ganhos ambientais do uso do etanol como biocombustível seriam insuficientes para considerá-lo uma fonte de energia limpa. Assim, mesmo a cana-de-açúcar apresentando alta eficiência fotossintética e sendo grande sequestradora de carbono, o prejuízo ambiental não é evitado em virtude da nocividade do N_2O para a atmosfera (CRUTZEN et al., 2008). O estudo, além de destacar que a liberação do N_2O no processo produtivo de oleaginosas, milho e cana-de-açúcar pode ser o triplo emitido na produção e uso do petróleo, contribuiu para aumentar as críticas e para justificar o boicote de vários países aos biocombustíveis, sobretudo ao etanol.

Carmo et al. (2013) comprovaram que as emissões diretas de N_2O no cultivo da cana-de-açúcar são bem inferiores às estimadas pela literatura internacional. Os autores realizaram estudo de campo em diversas regiões canavieiras do Estado de São Paulo, mostrando que o fator de emissão em canaviais adubados apenas com fertilizantes nitrogenados é de 0,68%, ou seja, de cada 100 quilogramas de N aplicado, 680 gramas foram convertidos em óxido nitroso e enviado para a atmosfera. No entanto, o fator de emissão aumenta para 3%, muito superior ao 1% considerado adequado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas-IPCC, se há o uso de vinhaça em solo com grande quantidade de palhada na superfície. A vinhaça é amplamente utilizada como fertilizante orgânico rico em K e em outros elementos, como o N e, quando aplicada em solos compactados ou com grande quantidade de palha, o que gera um ambiente hipóxico, há maior probabilidade de ocorrência do processo de desnitrificação, conseqüentemente aumentando as emissões de óxido nitroso (CARMO et al., 2013; OLIVEIRA; MORAES, 2016).

Nakícenovic; Grubler; MacDonald (1999) projetaram que, no final deste século, a energia proveniente da biomassa moderna e da energia solar representarão cerca de 60% da matriz energética mundial. O Brasil, através da cana-de-açúcar, e os Estados Unidos com o milho, despontam como os dois principais produtores de etanol, correspondendo a aproximadamente 90% da produção mundial (GOES; MARRA, 2008). Contudo, na questão de balanço energético, o etanol da cana-de-açúcar possui maior capacidade de redução das emissões de gases de efeito estufa, produzindo 9,3 unidades de energia renovável para uma de energia fóssil utilizada, enquanto para o etanol de milho essa relação é de 1,3 (Figura 2) (RODRIGUES, 2007).

O sorgo sacarino, em condições de cultivo no continente africano, mostrou um balanço energético positivo de quatro unidades de energia renovável para uma de energia fóssil utilizada (MACEDO, 2007). No Brasil, com a possibilidade de ser cultivado em áreas com solos de fertilidade construída, o sorgo sacarino poderia apresentar um balanço energético superior, uma

vez que combustível e os fertilizantes representam, respectivamente, 50 e 30% do consumo de energia de origem fóssil na fase de cultivo (CAMPOS; CAMPOS, 2004).

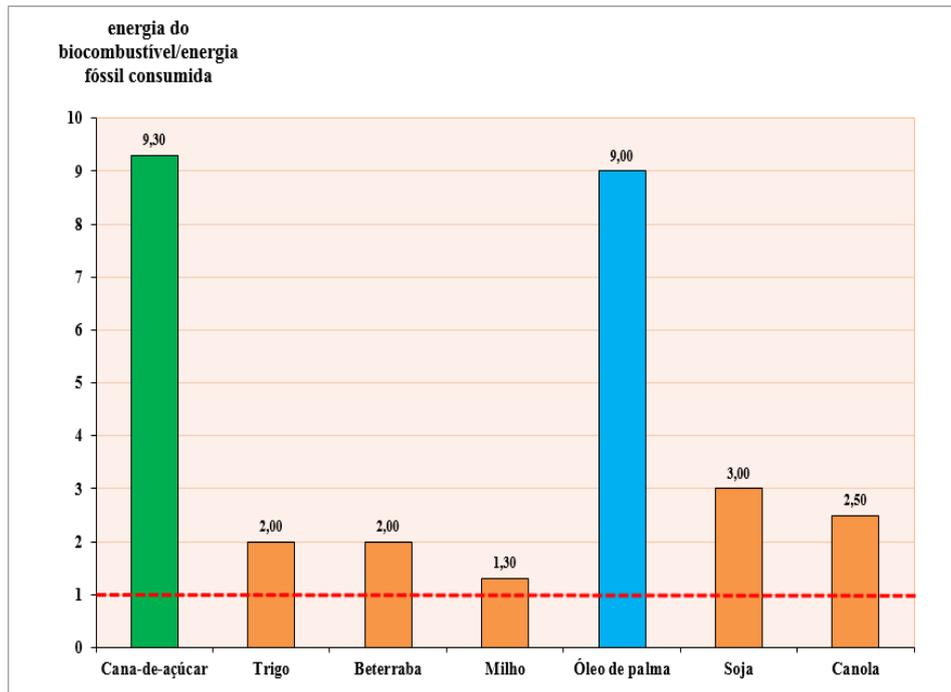


Figura 2. Balanço energético de culturas produtoras de biocombustíveis.

Fonte: adaptado de Rodrigues (2007).

É imprescindível que a produção de biocombustíveis como fonte de energia limpa seja sustentável. Os fertilizantes e corretivos agrícolas são responsáveis pelo aumento de cerca de 50% da produtividade das culturas. Por outro lado, quando aplicados de forma incorreta, podem afetar a qualidade, do solo, da água e do ar, aumentando inclusive a emissão de gases de efeito estufa (BRUULSEMA et al., 2008).

O uso eficiente de fertilizantes, para uma produção sustentável, pode ser entendido como o processo que visa utilizar a fonte de adubação correta, na dose certa, no momento e local correto (Tabela 2), fundamento das Boas Práticas para Uso Eficiente de Fertilizantes (BPUFs). Estas práticas destinam-se ao objetivo de ajustar a oferta de nutrientes às necessidades da lavoura e minimizar as suas perdas no campo. As combinações do produto, da dose, da época e do local correto dependem do sistema de manejo da cultura, do tipo de solo e das condições do clima (CASARIN; STIPP, 2013; REETZ, 2017).

A dose correta, foco deste estudo, é fundamental para ajustar o balanço de suprimento de nutrientes em função da remoção pelas culturas, principalmente em um solo de fertilidade construída, evitando estresse por deficiência nutricional e perdas econômicas (RESENDE et

al., 2016; REETZ, 2017). Doses excessivas podem ter como consequência a ineficiência no uso do nutriente, perdas econômicas e problemas ambientais. Em determinadas culturas, como no trigo (Figura 3), o excesso de nutrientes pode também resultar em toxicidade e comprometimento de atividades fisiológicas da planta, reduzindo a produtividade a um nível semelhante quando há déficit nutricional.

Tabela 2. Fundamentos das Boas Práticas para Uso Eficiente de Fertilizantes (BPUFs), considerando as estratégias do Sistema de gestão de Nutrientes 4C.

Fonte: adaptado de Reetz (2017).

Componente	Meta
Fonte Certa	Fornecer formas disponíveis para as plantas e um suprimento balanceado de todos os nutrientes essenciais. Tirar vantagens das várias formulações de fertilizantes que oferecem eficiência aumentada e reduzem os impactos ambientais.
Dose Certa	Assegurar um suprimento em quantidade adequada de todos os nutrientes essenciais para atender a demanda das plantas.
Época Certa	Manejar a aplicação de nutrientes para adequar as interações da absorção pelas culturas, suprimento pelo solo, riscos ambientais e logística de operações no campo.
Local Certo	Considerar a dinâmica das raízes e o movimento de nutrientes, manejar a variabilidade espacial dentro da área de plantio para o local e minimizar potencial perdas de nutrientes desta área.

Rao (2013) desenvolveu um estudo com sorgo sacarino em condições de campo na Índia com o objetivo de determinar o estágio de colheita e a dose ótima econômica de N e de K para o rendimento máximo de colmos, açúcar e etanol. A dose de 120 kg ha⁻¹ de N e de 40 kg ha⁻¹ de K e colheita quando as plantas de sorgo sacarino estavam em estágio de maturação fisiológica proporcionaram os máximos rendimentos agrônomo e industrial. Aplicações superiores a estas doses não contribuíram para a melhoria da qualidade tecnológica do sorgo sacarino, embora não evidenciam-se sintomas de toxidez e redução na produtividade de colmos.

O conceito de eficiência do uso de nutrientes (EUN), que estabelece a relação entre o aumento de produção das culturas por unidade de nutriente aplicado ou absorvido, tem adquirido maior relevância para a agricultura brasileira nos últimos anos, em função do aumento dos custos de produção e das pressões sociais sobre a agricultura para a redução do impacto ambiental (LOPES; GUILHERME, 2016; HICKMANN, 2014). Além da prática da adubação, que depende das características físico-químicas do solo, da planta e do fertilizante, a eficiência nutricional é influenciada por fatores como a disponibilidade de água, controle de doenças,

pragas e plantas infestantes, uma vez que interferem direta ou indiretamente na absorção e utilização de nutrientes pela planta (FAGERIA, 1998; ROBERTS, 2008).

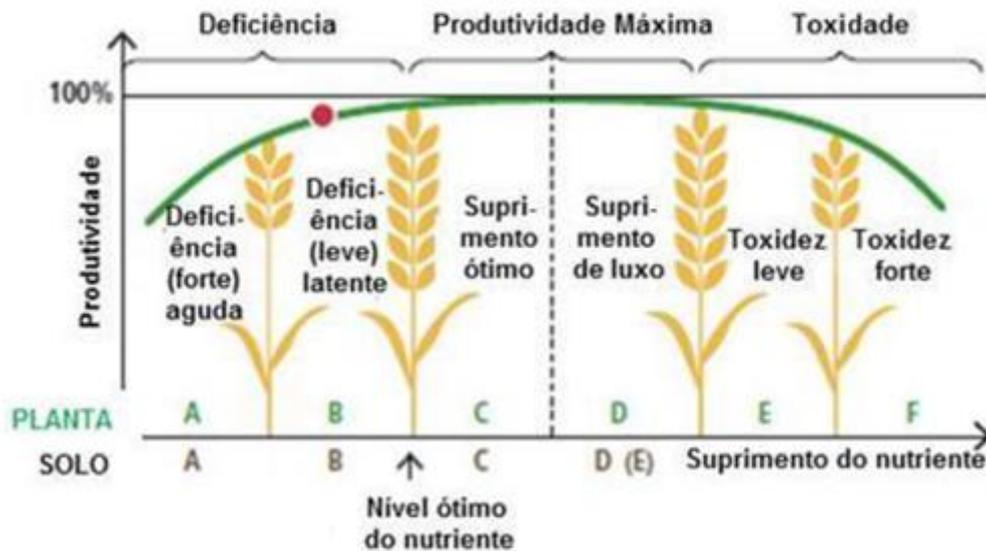


Figura 3. Influência das doses de fertilizantes na cultura do trigo, demonstrando os efeitos potenciais de deficiência ou toxicidade.

Fonte: adaptado de Reetz (2017).

Na literatura, várias são as maneiras de definir a eficiência nutricional, mas as mais comuns estão associadas a relações de absorção e utilização de nutrientes. Quando o produto da cultura colhida é o fator de interesse, calculam-se os índices de eficiência de produção; quando o foco está nos nutrientes recuperados pela cultura, pretende-se analisar os índices de eficiência de recuperação (FAGERIA, 1998; ROBERTS, 2008; REETZ, 2012). Assim, a eficiência nutricional pode ser expressa de diferentes maneiras, sendo que na Tabela 3 estão relacionadas as mais praticadas pela comunidade científica.

Wiedenfeld (1984) comentou que o uso eficiente de nutrientes é um fator importante para a análise de viabilidade do sorgo sacarino como fonte de energia renovável. Em seu estudo, em condições de campo no Texas e variando doses de N, o autor considerou a eficiência de uso como sendo o rendimento teórico de etanol por unidade de N absorvido. Observou que, à medida que aumenta a absorção do elemento, ocorre um decréscimo na eficiência nutricional, indicando que níveis baixos de adubação nitrogenada são suficientes para produzir rendimento adequado de etanol a partir do sorgo sacarino.

Tabela 3. Terminologias utilizadas para definição do uso eficiente de nutrientes.

Termos	Relação	Referências
Eficiência Agronômica	aumento em kg do produto da colheita/kg do nutriente aplicado	Fageria (1998); Snyder; Bruulsema (2007); Ramos (2014)
Eficiência de produção	aumento em kg do produto da colheita/kg absorvido do nutriente	Fageria (1998); Snyder; Bruulsema (2007); Ramos (2014)
Eficiência Fisiológica	aumento em kg na biomassa total/kg absorvido do nutriente	Fageria (1998); Snyder; Bruulsema (2007); Ramos (2014)
Eficiência de Uso	kg do produto da colheita/kg do nutriente aplicado	Moll; Kamprath; Jackson (1982); Ramos (2014)
Eficiência de Utilização	kg do produto da colheita/kg absorvido do nutriente	Moll; Kamprath; Jackson (1982); Ramos (2014)
Eficiência de Absorção	kg absorvido do nutriente/kg do nutriente aplicado	Moll; Kamprath; Jackson (1982); Ramos (2014)

O desfrute médio obtido com o uso de fertilizantes no Brasil, que corresponde à relação entre a exportação líquida de nutrientes pelas culturas e os *inputs* de nutrientes no sistema, revela que é preciso melhorar a eficiência, sobretudo das adubações com N e P, que é respectivamente de 65 e 53%, enquanto para K esta relação é de 82%. Investir nas Boas Práticas para Uso Eficiente de Fertilizantes, no manejo adequado dos componentes do sistema de produção e no melhoramento genético é alternativa importante para elevar estes índices (CUNHA et al., 2014). Para agroecossistemas cultivados em solos de fertilidade construída, este desafio é ainda maior.

2.4. Solos de fertilidade construída: repensando a estratégia de adubação

Nos últimos anos, investimentos em pesquisas e tecnologias para o campo alçaram o Brasil ao posto de um dos maiores produtores mundiais de alimentos. Graças ao conhecimento gerado por instituições de pesquisa e universidades, e cooperações com entidades de assistência técnica, extensão rural, iniciativa privada e produtores, em diferentes regiões do país, houve grande avanço no manejo agrícola, principalmente para a superação das limitações de ordem química dos solos. As técnicas de correção da acidez do solo e de aplicação de fertilizantes para

e elevar a disponibilidade de nutrientes tornaram-se práticas recorrentes na agricultura tecnificada e, nestes ambientes de cultivo, encontram-se, com maior frequência, a presença de solos de fertilidade construída (RESENDE et al., 2016).

O conceito de fertilidade construída pode ser entendido como a adequação das condições químicas de solos inicialmente ácidos e distróficos, através das práticas agronômicas de calagem, gessagem, adubações corretivas com P, K e micronutrientes e promoção de acúmulo ou manutenção dos teores de matéria orgânica. Ao longo do tempo, esse manejo promove alterações químicas, físicas e biológicas suficientes para as culturas expressarem potencial produtivo máximo, sem necessidade de grandes aportes de insumos (KAPPES; ZANCANARO, 2014; LACERDA et al., 2015; RESENDE et al., 2016). Comumente, as áreas de fertilidade construída apresentam elevadas produtividades muito em função dos altos teores de matéria orgânica, da maior capacidade de armazenamento de água no solo, onde as culturas são capazes de superar épocas de veranico, e dos solos com teores de nutrientes adequados para atender a demanda nutricional das culturas (RESENDE et al., 2016).

Resende et al. (2016) apresentaram em seu estudo um conjunto de dados de análises de solo de áreas de cultivo no cerrado de Minas Gerais, Goiás, Distrito Federal e Bahia, totalizando 78.122 amostras de solo da camada de 0 a 20 cm, representando cerca de 160 mil hectares. Os dados revelaram que solos de fertilidade construída é parte cada vez mais significativa no Cerrado, região caracterizada por solos pobres e de elevada acidez. Observaram que cerca de 80% das amostras estavam com baixos teores de alumínio trocável e valores adequados de saturação por bases (30 a 60% das amostras), enquanto teores elevados de P e K foram observados na maior parte das amostras, atestando que o efeito residual de adubações elevou os níveis destes elementos a patamares improváveis quando do início do cultivo nestas regiões.

Além das práticas de correção e adubação, a adoção do sistema de plantio direto (SPD) nestas áreas de Cerrado foram fundamentais para terem alcançado o *status* de fertilidade construída. Práticas agrícolas que favorecem a conservação ou o aumento da matéria orgânica, com a diversificação de espécies e aumento do aporte de palhada, são fundamentais para a estabilidade do sistema produtivo, uma vez que em solos tropicais, sobretudo os arenosos, a contribuição da matéria orgânica para o aumento da CTC é o manejo possível para a ampliação da capacidade de reserva e suprimento de nutrientes pelo solo (SÁ et al., 2010; LACERDA et al., 2015; RESENDE et al., 2016).

Em solos de fertilidade construída a baixa resposta com o aumento de doses de fertilizantes torna-se comum, devido a maior estocagem de nutrientes, tamponamento e

resiliência do solo. Estudos recentes em áreas de cultivo com anos de processo produtivo tecnificado e com plantio direto mostraram que respostas à adubação são de pequena magnitude, em que doses reduzidas de fertilizantes são suficientes para o alcance de rendimentos bastante satisfatórios (FONTOURA et al., 2010; RESENDE, 2011; LACERDA et al., 2015; RESENDE et al., 2016). Em função disso, as estratégias de adubação devem ser baseadas na disponibilidade do nutriente no solo, visando a construção, manutenção ou reposição da fertilidade. Ao passo que estas etapas vão sendo cumpridas, a planta passa a ser o fator que tem mais influência para o dimensionamento da adubação (Figura 5).

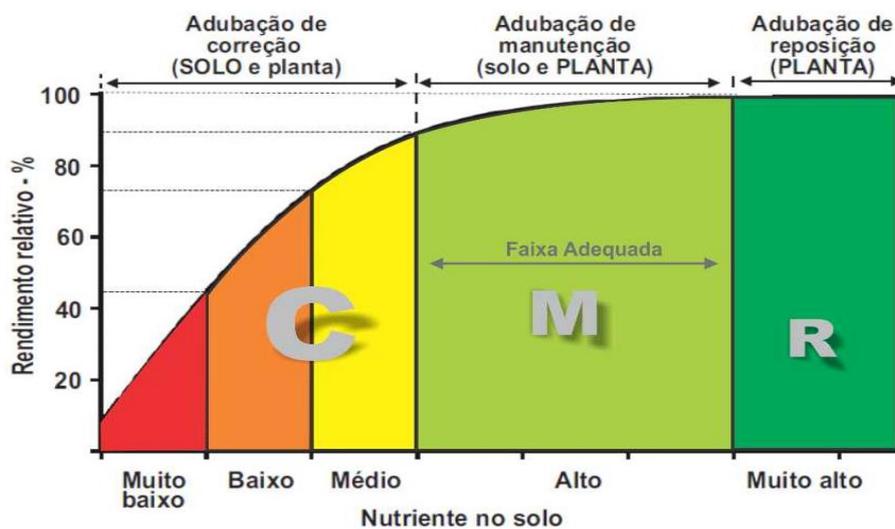


Figura 4. Dimensionamento da adubação com base na disponibilidade do nutriente no solo, visando a construção (C), manutenção (M) ou reposição da fertilidade (R).

Fonte: adaptado de Gianello; Wiethölter (2004).

Lacerda et al. (2015) estudaram a influência de doses de NPK, em semeadura e cobertura, em safras consecutivas de soja/milho/soja cultivadas sob plantio direto em um Latossolo vermelho-amarelo argiloso no município de Unaí-MG. Os resultados mostraram que as adubações pouco influenciaram nas produtividades, principalmente da soja, em que os tratamentos sem aplicação de fertilizantes não diferiram estatisticamente daqueles em que houve adubação. Com isso, a análise econômica revelou não ser compensatória a aplicação de fertilizantes em solos com disponibilidade alta ou muito alta de nutrientes.

Situações como a relatada por Lacerda et al. (2015) evidenciam que, quando o teto de produtividade está estabilizado em um patamar considerado suficiente pelo produtor, as adubações em solos de fertilidade construída serão mais eficientes quando dimensionadas a

partir da reposição do que foi exportado nas colheitas (FONTOURA et al., 2015; RESENDE et al., 2016). No entanto, se o produtor tiver por objetivo aumentar sua meta de produção, os *inputs* de nutrientes deverão ser proporcionalmente maior que a exportação, pois a eficiência de uso pelas plantas diminui quando se almejam novos patamares de rendimento, considerando ainda a necessidade de estudos de retorno econômico para tal prática (FONTOURA et al., 2015; VIEIRA et al., 2015; RESENDE et al., 2016).

Sobre estes aspectos, Resende et al. (2016) alertam que, para ajustar as adubações em solos de fertilidade construída, compatibilizando-as com as exigências nutricionais para altas produtividades, há a necessidade de confirmação e eventual elevação dos níveis críticos de nutrientes, que diz respeito ao teor do nutriente no solo associado à 90% da produção máxima da cultura, em tabelas regionalizadas, com intuito de aprimorar o diagnóstico para tomada de decisão sobre o correto manejo da adubação.

Em cultivos diversificados, onde cada cultura responde diferentemente quanto às exigências nutricionais e outros fatores que afetam direta ou indiretamente a produtividade, manter o equilíbrio nutricional é um ponto crítico no manejo dos solos de fertilidade construída, pois há variações dos estoques de nutrientes no solo em função de distintas entradas de nutrientes e saídas via exportação no produto colhido. Por isso, é comum observar a baixa eficiência de uso de fertilizantes em função de excessos de nutrientes e *déficits* de outros no sistema de cultivo, devido à aplicação de doses fixas de adubação pela maioria dos produtores, por temerem a redução de produtividade (BENITES et al., 2010; LACERDA et al., 2015; RESENDE et al., 2016).

Assim, o cálculo do balanço dos principais nutrientes é fundamental para melhor equilíbrio da adubação nos sistemas produtivos, por proporcionar impactos positivos em relação ao aproveitamento de recursos, eficiência no uso de nutrientes, rendimento e lucratividade do produtor, além de reduzir riscos ambientais (RESENDE et al., 2016).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área experimental

O estudo foi conduzido em área experimental do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos-UFSCar, localizado no Município de Araras-SP, com altitude de 690 metros, latitude 22°18'S e longitude 47°23'O, na safra 2015/2016. O clima local é do tipo Cwa (Köppen, 1948), mesotérmico com verões quentes e úmidos e invernos secos, com precipitação anual média de 1.430 mm e temperatura média anual de 21,45°C (GONÇALVES; FAGNANI; PERES, 2005).

As informações climáticas registradas durante o período de condução do experimento e utilizadas para a construção do balanço hídrico climtológico (Figura 5, Figura 6) foram coletadas junto à Estação Meteorológica Automática-EMA do Centro de Ciências Agrárias-CCA-UFSCar.

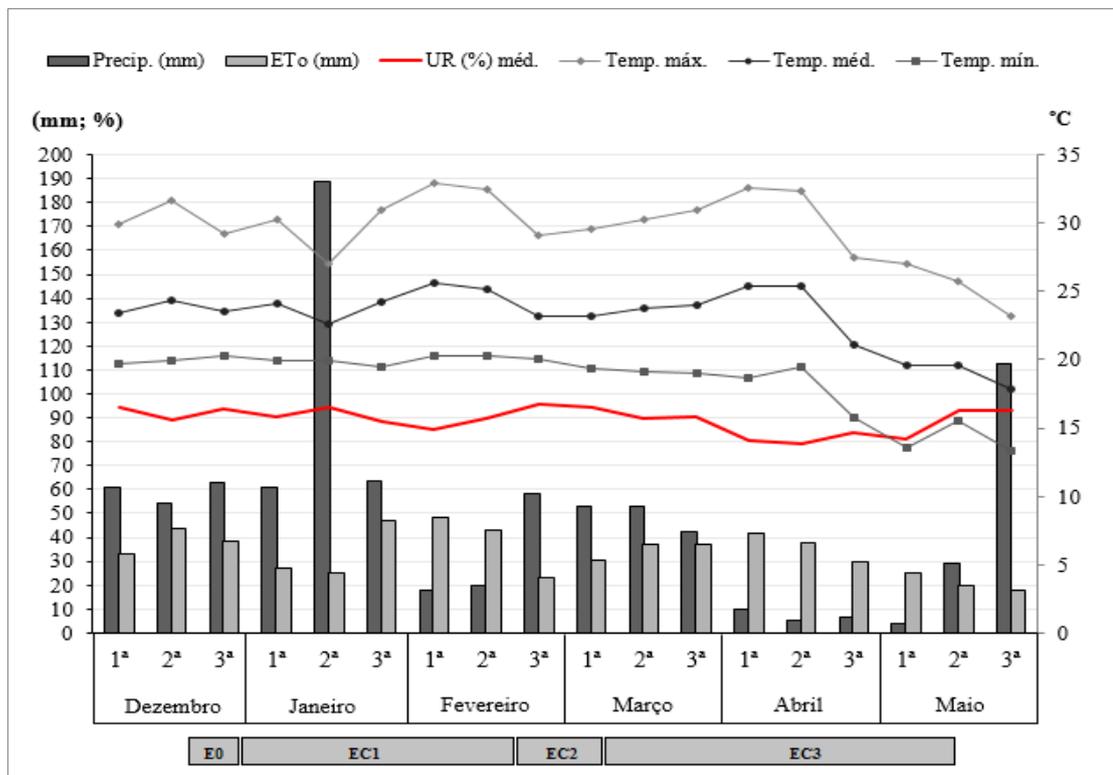


Figura 5. Dados decendiais (1º, 2º e 3º decêndio) de precipitação acumulada (Precip.), evapotranspiração de referência (ETo, método Penman-Monteith-FAO), umidade relativa média (UR%), temperaturas máxima (Temp. máx.), média (Temp. méd.) e mínima (Temp. mín.) registrados durante o período de condução do experimento. (Araras, SP, safra 2015/2016). E0: emergência das plântulas de sorgo; EC1: estágio de crescimento vegetativo até iniciação da panícula; EC2: final EC1 até florescimento; EC3: final EC2 até maturação fisiológica.

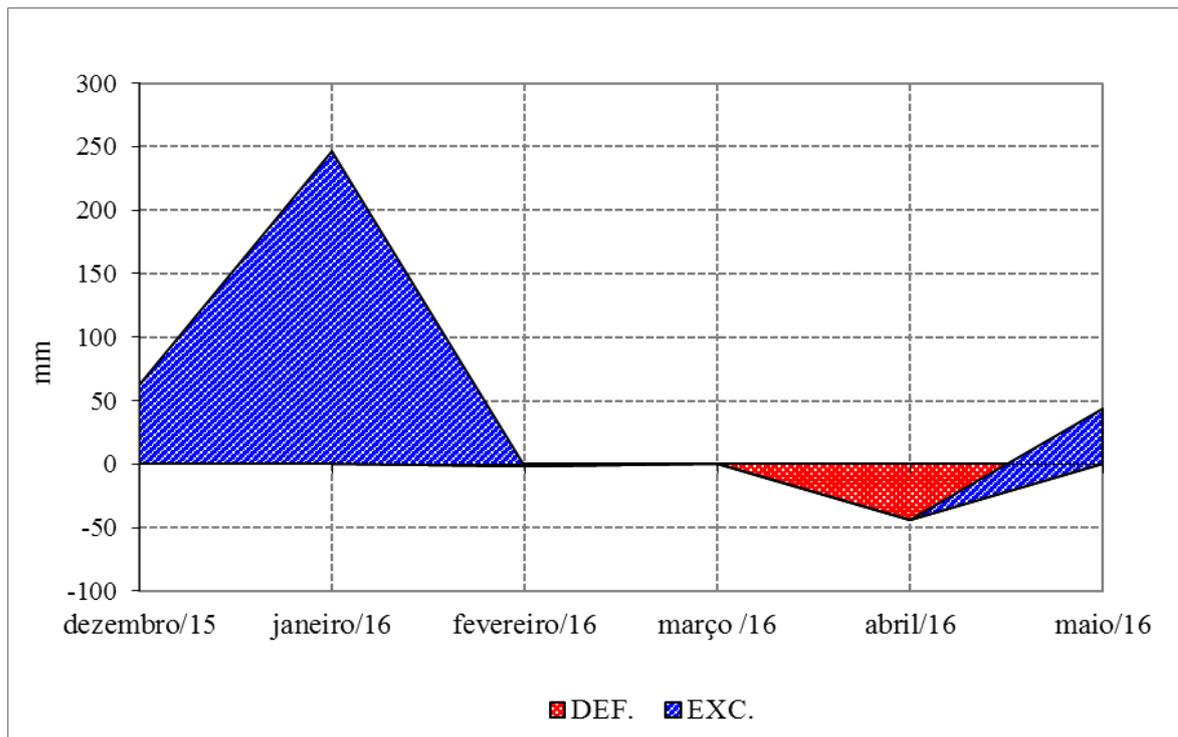


Figura 6. Balanço hídrico climatológico normal registrado durante o período de condução do experimento. DEF.: déficit hídrico; EXC.: excedente hídrico.

O experimento foi estabelecido em talhão com histórico de produção de grãos, cultivado principalmente com milho e soja, onde adotavam-se práticas de cultivo mínimo desde 2014. O solo da área experimental é classificado como LATOSSOLO Vermelho distrófico A moderado, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (SiBCS) (EMBRAPA, 2018). As características químicas e físicas da camada arável de 0-20 e 20-40 cm, antes da implantação do experimento, estão apresentadas na Tabela 4 e Tabela 5, respectivamente.

Tabela 4. Características químicas e granulometria de amostras da camada de 0-20 cm do LATOSSOLO Vermelho distrófico (Araras, SP, safra 2015/2016).

Prof.	pH	¹ MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	² SB	³ CTC _t
	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----						
	5,7	34,5	37,5	3,6	8,9	4,4	28,5	0,4	16,9	45,4
0-20 cm	V	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Areia	Silte	Argila
	%	-----mg dm ⁻³ -----						-----g kg ⁻¹ -----		
	37,2	29,0	0,1	14,0	49,4	234	3,5	150	190	660

¹MO=COx1,724; ²SB=Ca+Mg+K; ³CTC_t=SB+(H+Al); ⁴V=(SB/CTC_t)x100.

Tabela 5. Características químicas e granulometria de amostras da camada de 20-40 cm do LATOSSOLO Vermelho distrófico (Araras, SP, safra 2015/2016).

Prof. (cm)	pH	¹ MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	² SB	³ CTC _t	V	S	Areia	Silte	Argila
	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³				mmol _c dm ⁻³				%		g kg ⁻¹		
20-40	5,5	28,0	24,5	2,4	7,7	0,7	32,0	0,4	10,9	42,9	25,3	48,0	130	140	730

¹MO=COx1,724; ²SB=Ca+Mg+K; ³CTC_t=SB+(H+Al); ⁴V=(SB/CTC_t)x100.

3.2. Delineamento experimental

O experimento foi disposto no campo conforme o delineamento em blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas com cinco blocos, sendo quatro doses de adubação com NPK (0; 0,5; 1,0 e 1,5 da dose recomendada (DR)) e quatro épocas de colheita (90, 105, 120 e 135 dias após a emergência (DAE) das plantas) (Figura 7-A). As parcelas experimentais foram constituídas por dez linhas de 7 m de comprimento, sendo a área útil formada pelas seis linhas centrais, desprezando-se 1 m do início e do final da linha, totalizando 17,5 m² (Figura 7-B).

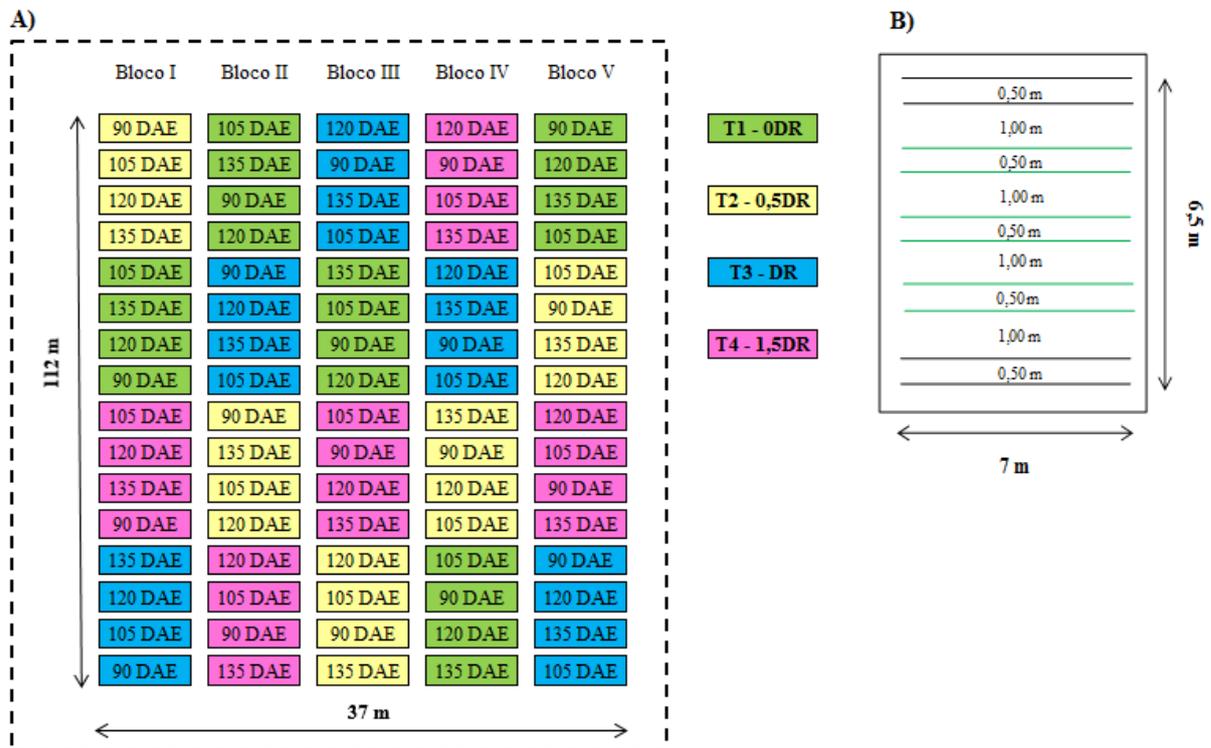


Figura 7. Esquema de distribuição das parcelas e das subparcelas do experimento com sorgo sacarino submetido a doses de adubação com macronutrientes primários (A); detalhe de uma unidade experimental (B), com linhas verdes indicando área útil da parcela. DAE: dias após a emergência; T1 a T4: tratamentos com doses de NPK.

3.3. Instalação e condução do experimento

O preparo do solo iniciou-se aos 60 dias antes da semeadura, utilizando-se 1,7 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT de 85,6%) para elevar a saturação por bases (V%) a 70 % (BOLONHEZI; FREITAS; SAWAZAKI, 2014). Posteriormente, realizaram-se a aração e a gradagem da área experimental para incorporação do calcário aplicado. Vinte dias antes do plantio, procedeu-se o controle de plantas daninhas com os herbicidas desseccantes glifosato e 2,4-D, na dosagem de 1 e 2 L ha⁻¹ do produto comercial, respectivamente. A semeadura manual ocorreu em 15/12/2015, em solo gradeado, destorroado e nivelado. A sulcação foi feita com espaçamento em fileiras duplas de 1,00 x 0,50 x 0,50 m, adaptado para bitolas de colhedoras de cana-de-açúcar.

O material genético selecionado foi o sorgo sacarino híbrido Malibu 5010 da Nexsteppe Inc., insensível ao fotoperíodo, de ciclo médio (em torno de 120 dias), produção de biomassa de 60 a 80 t ha⁻¹ e produtividade de etanol de mais de 3.000 L ha⁻¹ (Nexsteppe Sementes do Brasil, 2018). A semente foi depositada a três centímetros e o fertilizante entre oito a dez centímetros de profundidade. A densidade de plantio foi de 8 sementes metro⁻¹, realizando-se, após emergência do sorgo sacarino, o desbaste para se atingir uma população final de cerca de 120.000 plantas ha⁻¹.

A dose recomendada (DR) de adubação baseou-se nas instruções de Bolonhezi; Freitas; Sawazaki (2014) e Raij et al. (1997). Considerou-se o nível médio de resposta a N, uma vez que a área se encontrava em pousio por tempo não superior a um ano e a condição da semeadura não ser realizada sobre a palhada de cana-de-açúcar crua, adotando-se uma adubação de plantio de 20 kg ha⁻¹ e de cobertura de 90 kg ha⁻¹, totalizando 110 kg ha⁻¹ de N. A fonte direta de N utilizada foi o nitrato de amônio (30% de N) e a indireta o superfosfato simples (3% de N).

As DRs de P e de K foram estabelecidas levando-se em conta o teor destes nutrientes no solo (Tabela 4) e os limites de interpretação sugeridos por Raij et al. (1997). Para o P, o teor encontrado no solo foi considerado médio, recomendando-se 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Para o K, o teor foi considerado alto, recomendando-se 120 kg ha⁻¹ de K₂O, parcelando-se 50 kg ha⁻¹ na semeadura e o restante em cobertura (BOLONHEZI; FREITAS; SAWAZAKI, 2014). As fontes empregadas foram o superfosfato simples (17% de P₂O₅) e o cloreto de K (58% de K₂O).

Bolonhezi; Freitas; Sawazaki (2014) recomendaram, independentemente da fertilidade do solo, a aplicação de até 30 kg ha⁻¹ de enxofre (S). Este elemento também compõe o fertilizante superfosfato simples (11% de S). De acordo com os tratamentos estudados (Tabela

6), o aporte de enxofre proveniente da adubação fosfatada foi de 26 kg ha⁻¹ para o tratamento com 0,5DR, 52 kg ha⁻¹ com DR e 78 kg ha⁻¹ com 1,5DR.

Para a adubação com micronutrientes, foi necessário o aporte de 2 kg ha⁻¹ de B, uma vez que a análise do solo (Tabela 4) apontou baixa disponibilidade apenas deste micronutriente (RAIJ et al., 1997; BOLONHEZI; FREITAS; SAWAZAKI, 2014).

A Tabela 6 apresenta resumidamente as doses de fertilizantes aplicadas em seus respectivos tratamentos. Detalhes dos cálculos estão no Anexo II.

Tabela 6. Doses aplicadas em seus respectivos tratamentos, considerando DR 110-80-120 kg ha⁻¹ de NPK.

Trat.	Adubação de plantio				Adubação de cobertura		Adubação com micronutrientes	
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	N	K ₂ O	B	Zn
	kg ha ⁻¹							
0DR	0	0	0	0	0	0	2	0
0,5DR	10	40	25	26	45	35	2	0
1,0DR	20	80	50	52	90	70	2	0
1,5DR	30	120	75	78	135	105	2	0

N: nitrato de amônio (30% de N) e superfosfato simples (3% de N); P: superfosfato simples (17% de P₂O₅); K: cloreto de potássio (58% de K₂O); B: ácido bórico (17% de B).

Os fertilizantes foram homogeneizados em betoneira com capacidade de 200 litros, sendo que a aplicação dos fertilizantes no plantio foi de 19,02 g m⁻¹ para o tratamento com 0,5 DR, 38,04 g m⁻¹ para o tratamento com a DR e 57,07 g m⁻¹ para o tratamento com 1,5DR.

A adubação de cobertura foi realizada aos 20DAE, quando as plantas de sorgo sacarino apresentavam quatro folhas totalmente expandidas. A aplicação de fertilizantes em cobertura foi de 13,54 g m⁻¹ para o tratamento com 0,5DR, 27,08 g m⁻¹ para o tratamento com 1,0DR e 40,63 g m⁻¹ para o tratamento com 1,5DR.

O controle de plantas infestantes foi realizado em pós-emergência com herbicida com princípio ativo atrazina na dosagem de 3 L ha⁻¹ do produto comercial. Procederam-se duas capinas manuais para controle de capim-carrapicho (*Cenchrus echinatus* L.) e capim-amargoso (*Digitaria insularis* L. Fedde). Foram realizadas pulverizações com o inseticida lambda-cialotrina na dosagem de 300 mL ha⁻¹, para controle da lagarta-do-cartucho [*Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae)] e da broca-da-cana-de-açúcar [*Diatraea saccharalis* (Fabr., 1794) (Lepidoptera: Crambidae)]. Adicionalmente, devido à infestação por insetos sugadores, como o percevejo-barriga-verde [(*Dichelops furcatus*) (Dallas) (Hemiptera:

Pentatomidae)], foi realizada uma aplicação com o inseticida clorotraniliprole na dosagem de 125 mL ha⁻¹.

Quando as plantas de sorgo sacarino alcançaram o estágio de folha bandeira visível (Figura 8), procedeu-se a aplicação do retardador de florescimento Ethrel[®] 720, princípio ativo ethephon, na dosagem de 1,25 L ha⁻¹, com intuito de inibir o desenvolvimento da panícula (dreno de carboidratos) e evitar o progresso da doença açucarada (*Ergot*).



Figura 8. Detalhe de uma planta de sorgo sacarino apresentando folha bandeira visível (indicada pela seta). Fonte: adaptado de Nexsteppe Sementes do Brasil (2018).

3.4. Avaliações biométricas e da produtividade

Para as avaliações biométricas, foram colhidas 20 plantas aleatoriamente de cada uma das seis linhas da área útil da parcela, aos 90, 105, 120 e 135 dias após a emergência das plantas (DAE). Os procedimentos foram os seguintes (PARRELA et al., 2010; NAGAI, 2010):

- a) Altura da planta** (A, m): medição com régua graduada, partindo-se do entrenó basal do colmo até o ápice da panícula.
- b) Diâmetro do colmo** (D, mm): diâmetro no terço médio do colmo, empregando-se paquímetro analógico.
- c) Número de entrenós** (NE, nós planta⁻¹): foi mensurada a quantidade de nós das plantas selecionadas.

d) Produção de colmos por hectare (PC, t ha⁻¹): calculada pela massa do colmo de plantas contidas em um metro linear de cada uma das seis linhas da área útil da parcela, despalhadas e sem panículas.

e) Biomassa verde (BV, t ha⁻¹): calculada pela massa de plantas contidas em um metro linear de cada uma das seis linhas da área útil da parcela, com folhas e panículas.

f) Biomassa Seca (BS, t ha⁻¹): amostras de biomassa verde foram acondicionadas em sacos de papel e colocadas para secar em estufa de circulação e renovação de ar forçado a 65°C, até atingirem massa constante, convertendo os valores para t ha⁻¹.

g) Massa seca da panícula (MSP, g): calculada pela massa das panículas de plantas contidas em um metro linear de cada uma das seis linhas da área útil da parcela. Posteriormente, as amostras de cada tratamento foram acondicionadas em sacos de papel e colocadas para secar em estufa de circulação e renovação de ar forçado a 65°C, até atingirem massa constante.

3.5. Análises tecnológicas do caldo

Para a avaliação da qualidade tecnológica do caldo foram colhidas plantas contidas em um metro linear de cada uma das seis linhas da área útil da parcela, despalhadas e sem panículas, aos 90, 105, 120 e 135 dias após a emergência das plantas (DAE). Realizou-se a desintegração do material em aparelho tipo forrageira, com posterior homogeneização e seleção de amostra de 500 g para retirada do caldo em prensa hidráulica (250 kgf cm⁻²) durante um minuto.

O caldo extraído foi utilizado para as determinações químicas de qualidade e o bagaço para a avaliação da fibra pelo Laboratório de Análises e Simulação Tecnológica (LAST-UFSCar), utilizando a metodologia do Sistema de Pagamento de Cana pelo Teor de Sacarose (PCTS), desenvolvida pela CONSECANA (2006), com exceção do rendimento de etanol, cujo cálculo foi baseado em Ramos (2014). Foram realizadas as seguintes determinações:

a) °Brix (%): a quantidade de sólidos solúveis presentes no caldo foi determinada em refratômetro de bancada.

b) Pol do caldo (%): porcentagem aparente de sacarose no caldo, determinada pela polarização direta de solução de peso normal, utilizando um sacarímetro, e calculada pela equação:

$$S = (1,00621 \times LAI + 0,05117) \times (0,2605 - 0,0009882 \times B) \quad (\text{Eq.1})$$

Em que: LAI é a leitura sacarimétrica, obtida com a mistura clarificante à base de alumínio, e B é o Brix do caldo (%).

c) Fibra (%): considerada a porcentagem em massa de matéria seca insolúvel presente na biomassa, determinada pelo método de Tanimoto (Norma N-143) e calculada pela seguinte equação:

$$F = [(100 \times \text{PBS}) - (\text{PBU} \times \text{B})] \div [5 \times (100 - \text{B})] \quad (\text{Eq.2})$$

Em que: PBS: massa do bagaço seco (g);

PBU: massa do bagaço úmido (g);

B: Brix do caldo (%)

d) ATR (kg t⁻¹): açúcar total recuperável, variável que quantifica os açúcares redutores totais presentes na amostra, calculada pela equação:

$$\text{ATR} = 9,5263 \times \text{PC} + 9,05 \times \text{ARS} \quad (\text{Eq.3})$$

Em que: PC: Pol do sorgo: $\text{PC} = \text{POL} \times (1 - 0,01 \times \text{F}) \times \text{C}$

$$\text{C} = 1,0313 - 0,00575 \times \text{F}$$

$$\text{ARS: Açúcares redutores do sorgo: } \text{ARS} = \text{AR} \times (1 - 0,01 \times \text{F}) \times \text{C}$$

e) AR (%): percentual de açúcares redutores, compreendendo glicose, frutose e demais substâncias reductoras presentes na amostra, calculado pela equação:

$$\text{AR} = 3,641 - 0,0343 \times \text{Pureza} (\%) \quad (\text{Eq.4})$$

f) Pureza (%): relação entre a porcentagem em massa de sacarose e a de sólidos solúveis contida em uma solução açucarada, calculada pela equação:

$$\text{P} = 100 \times \text{Pol} / \text{Brix} \quad (\text{Eq.5})$$

g) Rendimento de etanol (L ha⁻¹): foi obtido utilizando as equações descritas por Ramos (2014):

$$\text{RE} = \text{AF} * 665 \quad (\text{Eq.6})$$

Em que: AF açúcar fermentável (t ha⁻¹) = $\text{QS} * \text{Brix} (\text{kg t}^{-1}) * 0,75$

QS= quantidade de suco (t ha⁻¹)

3.6. Avaliações nutricionais do sorgo sacarino

Para avaliação do estado nutricional do sorgo sacarino, foi realizada coleta de plantas inteiras contidas em um metro linear de cada uma das seis linhas da área útil da parcela de cada tratamento, em todas as épocas de colheita, com folhas e panículas. O material foi desfibrado, sendo retirada uma subamostra, acondicionada em saco de papel e colocada para secar em estufa de circulação e renovação de ar forçado a 65°C, até atingir massa constante. Posteriormente, as subamostras foram trituradas em moinho tipo Willey (malha de 2 mm) e submetidas à digestão sulfúrica, para extração de N, e nítrico-perclórica, para a extração dos demais macronutrientes (EMBRAPA, 1997). A determinação analítica ocorreu por: N - semimicro-Kjeldahl; P - colorimetria do metavanadato; K - fotometria de chama de emissão (EMBRAPA, 1997).

Para avaliar a fertilidade do solo após o cultivo do sorgo sacarino com diferentes doses de adubação, foram realizadas amostragens em todos os tratamentos, nas entrelinhas da área útil de cada parcela, na profundidade de 0 a 20 cm. O material coletado foi analisado quimicamente pelo Laboratório de Fertilidade do Solo da UFSCar, *campus* Araras-SP, conforme metodologia descrita em Raij et al. (2001).

3.7. Eficiência Nutricional

A avaliação da eficiência nutricional foi determinada a partir dos cálculos de Eficiência Agronômica, Fisiológica e de Produção, conforme metodologia de Fageria (1998). As Eficiências de Uso, de Absorção e de Utilização foram calculadas segundo método proposto por Moll; Kamprath; Jackson (1982).

a) Eficiência Agronômica: EA (kg kg⁻¹)

$$EA = \frac{PC_D - PC_{0DR}}{NPKa} \quad (\text{Eq.7})$$

Em que: PC_D é a produtividade de colmos por hectare nas doses estudadas (NPK: 0,5; 1,0 ou 1,5DR), expressa em kg ha⁻¹.

PC_{0DR} é a produtividade de colmos por hectare sem aplicação de NPK (0DR) em kg ha⁻¹.

NPKa: NPK aplicado em kg ha⁻¹.

b) Eficiência Fisiológica: EF (kg kg^{-1})

$$EF = \frac{BS_D - BS_{0DR}}{NPK_{tD} - NPK_{t0DR}} \quad (\text{Eq.8})$$

Em que: BS_D é a biomassa seca total na dose estudada (NPK: 0,5; 1,0 ou 1,5DR) expressa em kg ha^{-1} .

BS_{0DR} é a biomassa seca total sem aplicação de NPK (0DR) em kg ha^{-1} .

NPK_{tD} : NPK na massa seca total na dose estudada em kg ha^{-1} .

NPK_{t0DR} : NPK na massa seca total sem aplicação de NPK (0DR) em kg ha^{-1} .

c) Eficiência de Produção: EP (kg kg^{-1})

$$EP = \frac{PC_D - PC_{0DR}}{NPK_{tD} - NPK_{t0DR}} \quad (\text{Eq.9})$$

Em que: PC_D é a produtividade de colmos por hectare na dose estudada (NPK: 0,5; 1,0 ou 1,5DR) expressa em kg ha^{-1} .

PC_{0DR} é a produtividade de colmos por hectare sem aplicação de NPK (0DR) em kg ha^{-1} .

NPK_{tD} : NPK na massa seca total na dose estudada em kg ha^{-1} .

NPK_{t0DR} : NPK na massa seca total sem aplicação de NPK (0DR) em kg ha^{-1} .

d) Eficiência de Uso: EU (kg kg^{-1})

$$EU = \frac{PC_D}{NPK_a} \quad (\text{Eq.10})$$

Em que: PC_D é a produtividade de colmos por hectare na dose estudada (NPK: 0,5; 1,0 ou 1,5DR) expressa em kg ha^{-1} .

NPK_a : NPK aplicado em kg ha^{-1} .

e) Eficiência de Absorção: EAb (kg kg^{-1})

$$EAb = \frac{NPK_{tD}}{NPK_a} \quad (\text{Eq.11})$$

Em que: NPK_{tD} : NPK na massa seca total na dose estudada (NPK: 0,5; 1,0 ou 1,5DR) em kg ha^{-1} .

NPK_a : NPK aplicado em kg ha^{-1} .

f) Eficiência de Utilização: EU_t (kg kg^{-1})

$$EU_t = \frac{PC}{NPK_{tD}} \quad (\text{Eq.12})$$

Em que: PC é a produtividade de colmos por hectare em cada dose estudada (NPK: 0,5; 1,0 ou 1,5DR).

NPK_{tD} : NPK na massa seca total na dose estudada (NPK: 0,5; 1,0 ou 1,5DR) em kg ha^{-1} .

3.8. Estimativa da fertilidade do solo de áreas de reforma de cana-de-açúcar

A estimativa da fertilidade do solo das camadas aráveis de áreas de reforma de cana-de-açúcar foi elaborada a partir de dados disponíveis pelo International Plant Nutrition Institute (IPNI) através da publicação “Resultados do Levantamento da Fertilidade dos Solos do Estado de São Paulo” (PROCHNOW et al., 2018). Neste trabalho, participaram 26 laboratórios credenciados pelo Programa de Controle de Qualidade das Análises de Solo do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), fornecendo informações relativas ao município, teores contidos nas análises de rotina e de micronutrientes, referentes ao ano de 2015.

Neste estudo, selecionaram-se os seguintes parâmetros: pH em CaCl_2 , teores de matéria orgânica (M.O.), de P_{resina} e de K^+ e saturação por bases (V%). Assim como Prochnow et al. (2018), adotou-se a mediana e não a média dos parâmetros selecionados, por ser uma medida de tendência central que minimiza o efeito de pontos discrepantes.

Como os dados estavam dispostos por município, procedeu-se o levantamento das áreas cultivadas com cana-de-açúcar a partir da Pesquisa Agrícola Municipal (PAM), disponibilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018). Os municípios, que apresentaram em 2015 área plantada com cana-de-açúcar igual ou superior a 90% da área agrícola total, foram selecionados para compor o banco de dados. Após esta etapa, descartaram-se os municípios que não apresentaram todos os parâmetros reunidos, restando as informações de 60 localidades do Estado de São Paulo.

No levantamento realizado por Prochnow et al. (2018), não foram disponibilizados dados de matéria orgânica agrupados por município. Por isso, considerando a importância deste quesito para a fertilidade do solo, a estimativa do teor de matéria orgânica das camadas aráveis de áreas de reforma de cana-de-açúcar foi efetuada a partir de 178 amostras de solo analisadas

pelo Laboratório de Fertilidade do Solo da Universidade Federal de São Carlos, relativas ao ano de 2015. O laboratório foi um dos 26 participantes do levantamento dos referidos autores.

Os dados foram tabulados e inseridos no programa MS Excel[®], para classificá-los nas faixas de fertilidade (Tabela 7) indicadas por Raij et al. (1997). A matéria orgânica foi classificada conforme Alvarez et al. (1999).

Tabela 7. Classes de interpretação de fertilidade do solo de acordo com os valores de pH (em CaCl₂), M.O., P e K.

Atributo	Faixas de interpretação
pH	 muito alta (até 4,3), alta (> 4,3 a 5,0), média (> 5 a 5,5), baixa (>5,5 a 6,0) e muito baixa (> 6,0)
M.O.	 muito baixo (menor 7,1 g dm ⁻³), baixo (7,1 a 20 g dm ⁻³), médio (20,01 a 40 g dm ⁻³) bom (40,01 a 70 g dm ⁻³) e muito bom (> 70 g dm ⁻³)
P	Culturas anuais: muito baixo (0 a 6 mg dm ⁻³), baixo (> 6 a 15 mg dm ⁻³), médio (> 15 a 40 mg dm ⁻³), alto (> 40 a 80 mg dm ⁻³) e muito alto (> 80 mg dm ⁻³)
K ⁺	Culturas anuais: muito baixo (0 a 0,7 mmol _c dm ⁻³), baixo (> 0,7 a 1,5 mmol _c dm ⁻³), médio (>1,5 a 3,0 mmol _c dm ⁻³), alto (> 3,0 a 6,0 mmol _c dm ⁻³) e muito alto (> 6,0 mmol _c dm ⁻³)
V%	Culturas anuais: muito baixo (0 a 25%), baixo (> 25 a 50%), médio (> 50 a 70%), alto (> 70 a 90%) e muito alto (> 90%)

3.9. Análise estatística

Os resultados foram submetidos a testes de normalidade e de homocedasticidade das variâncias para possibilitar a aplicação da análise de variância (ANOVA). Para as variáveis que não apresentaram estes requisitos, procedeu-se a transformação em log (x), conforme metodologia proposta por Box; Cox (1964).

Para os resultados de eficiência nutricional, que apresentaram valores negativos, procedeu-se a transformação das variáveis originais conforme metodologia proposta por Wicklin (2011) em que:

$$f(x_i) = \begin{cases} \ln(x_i), & x_i > 0 \\ 0, & x_i < 0 \end{cases}$$

Quando o teste F da ANOVA foi significativo ($p < 0,05$), as médias dos tratamentos foram comparadas através do teste de Tukey a 5% de significância. Para os fatores quantitativos, foi realizada a análise de modelos polinomiais de regressão, empregando para todos os procedimentos estatísticos o programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2018).

3.10. Análise econômica da adubação

A análise econômica baseou-se nos indicadores de rentabilidade como a produtividade, receita bruta, custo da adubação e receita líquida. O custo da adubação foi obtido pela soma dos custos de aquisição dos fertilizantes e da operação mecanizada. Os preços dos fertilizantes utilizados como referência foram cotados no mês de junho de 2018: nitrato de amônio R\$ 0,82 kg^{-1} (INTL-FC STONE, 2018); supersimples: R\$1,28 kg^{-1} ; e cloreto de potássio R\$ 1,99 kg^{-1} (IEA, 2018). O custo da aplicação de fertilizantes foi de R\$ 47,67 ha^{-1} , conforme May et al. (2013), corrigidos pelo IGP-M (setembro de 2013 a junho de 2018) (FGV, 2018). A receita bruta foi calculada considerando o preço pago ao produtor por tonelada de cana-de-açúcar, referente ao mês de junho de 2018, que foi de R\$ 64,80 t^{-1} (IEA, 2018). A receita líquida foi calculada pela diferença entre receita bruta e custo da adubação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. ANOVA das avaliações biométricas e da produtividade

A análise de variância apontou a falta de interação significativa entre as doses de NPK e as épocas de colheita, para todos os indicadores biométricos e de produtividade (Tabela 8), indicando que não houve relação de dependência entre a época de corte do sorgo sacarino com a quantidade de adubação aplicada. Os coeficientes de variação situaram-se entre 5 e 20%, o que sugere uma boa precisão experimental, para condições de campo.

Tabela 8. Análise de variância (ANOVA) e análise de regressão para modelo polinomial de variáveis biométricas e de produtividade de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliadas em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).

ANOVA: p-valor do teste F								
FV	gl	PC	BV	BS	Altura	Diâmetro	NE	¹ MSP
Bloco	4	0,67 ^{ns}	0,54 ^{ns}	0,76 ^{ns}	0,65 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,12 ^{ns}
Dose (D)	3	0,02*	0,02*	0,29 ^{ns}	0,97 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,74 ^{ns}	0,04*
Época colheita (E)	3	0,06 ^{ns}	<0,01**	<0,01**	0,43 ^{ns}	<0,01**	0,02*	<0,01**
D x E	9	0,90 ^{ns}	0,90 ^{ns}	0,70 ^{ns}	0,97 ^{ns}	0,64 ^{ns}	0,99 ^{ns}	0,41 ^{ns}
ANOVA da Regressão								
Dose (D)	1	L**	L**	ns	ns	ns	ns	L*
Época colheita (E)	1	ns	Q**	Q**	ns	Q**	L*	Q**
D x E	1	ns						
CV% (D)		16,73%	15,78%	18,84%	6,03%	7,13%	6,29%	9,25%
CV% (E)		19,05%	18,49%	18,23%	5,16%	10,76%	7,86%	13,74%
Norm. (teste S-W)		0,88	0,92	0,68	0,05	0,52	0,22	0,96

FV: fonte de variação; gl: grau de liberdade; ns: não significativo; *significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ** significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ¹Para atender pressuposição de normalidade (p-valor $\geq 0,05$) os dados foram transformados conforme metodologia de Box & Cox (1964). L: ajuste de regressão linear; Q: ajuste de regressão quadrática. PC: produtividade de colmos; BV: biomassa verde; BS: biomassa seca; NE: número de entrenós; MSP: massa seca da panícula. CV%: coeficiente de variação; Norm.: normalidade; teste S-W: teste de Shapiro-Wilk.

Os resultados permitiram refutar a hipótese de que a adubação em um solo de fertilidade construída influencia nas variáveis de crescimento, de tal modo que se possa adiantar ou retardar a época de colheita do sorgo sacarino. A análise isolada dos fatores mostrou diferenças significativas entre as doses para as variáveis produtividade de colmos (PC), biomassa verde (BV) e massa seca da panícula (MSP). A época de corte provocou efeitos significativos para a maioria das variáveis, com exceção da PC e da altura (A). Ajustes significativos de modelo de regressão também seguiram este padrão.

A ausência da interação entre fontes de NPK e épocas de colheita também foi reportada por Mursyid; Salengke; Rosmaeni (2017), em um estudo conduzido na Indonésia, testando três

cultivares de sorgo sacarino. Os autores esperavam que fontes de liberação lenta e convencional de NPK pudessem influenciar distintamente o desenvolvimento dos cultivares antes, durante e depois da maturação fisiológica. No entanto, as respostas diferiram entre os fatores cultivares e entre as fontes de NPK aplicadas, de forma independente.

4.1.1. Resposta agronômica e econômica da adubação para a produtividade

A produtividade de colmos (PC), um dos critérios mais importantes para produção de etanol, situou-se entre 48,16 e 72,15 t ha⁻¹, com pequena variabilidade das médias estimadas (Tabela 9). Estes valores atendem a expectativa mínima exigida pelas indústrias sucroenergéticas para o sorgo sacarino, que é de 50 t ha⁻¹ (BOLONHEZI; FREITAS; SAWAZAKI, 2014). A ausência da adubação NPK apresentou média acima desta meta, embora tenha diferido estatisticamente de 1,5DR (165-120-175 kg ha⁻¹ de NPK), dose de maior rendimento (Figura 9).

Tabela 9. Produtividade média de colmos (PC) de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliada em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).

PC (t ha ⁻¹)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (dose)
0DR	48,16 ^{±6,54}	58,60 ^{±5,39}	52,72 ^{±2,53}	57,33 ^{±2,78}	54,20^{±2,33} b
0,5DR	56,44 ^{±4,54}	67,70 ^{±3,79}	61,33 ^{±5,09}	61,57 ^{±6,78}	61,76^{±2,54} ab
1,0DR	60,60 ^{±4,87}	67,76 ^{±2,83}	60,75 ^{±4,83}	52,36 ^{±4,71}	60,37^{±2,37} ab
1,5DR	62,85 ^{±3,77}	72,15 ^{±5,82}	69,30 ^{±8,04}	62,43 ^{±3,62}	66,68^{±2,75} a
Média (DAE)	57,01^{±2,64} A	66,55^{±2,40} A	61,02^{±2,85} A	58,42^{±2,35} A	
DMS ExD = 18,79		DMS Dx E= 19,49		DMS D= 9,55 DMS E= 9,74	

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Numeração sobrescrita indica o erro padrão da média.

PC: produtividade de colmos; DR: dose recomendada (110-80-120 kg ha⁻¹ de NPK); DAE: dias após emergência; DMS: diferença mínima significativa; Dx E: desdobramento da dose dentro de épocas de colheita; ExD: desdobramento da época de colheita dentro de doses; E: época de colheita.

Estudos revelaram que a produtividade de colmos é de grande variabilidade entre os genótipos de sorgo sacarino, em sua maioria apresentando médias inferiores a 50 t ha⁻¹. Na Índia, Kumar et al. (2010) avaliaram 19 cultivares de sorgo sacarino em um Vertissolo, no verão de 2009 e de 2010, obtendo produtividade de colmos entre 35 e 46 t ha⁻¹. Em Alagoas, Silva et al. (2016) observaram o desempenho produtivo de genótipos de sorgo sacarino na região canavieira de Alagoas, obtendo média de biomassa verde de colmos de 33,71 t ha⁻¹. Neste

questo, o híbrido Malibu 5010 mostrou desempenho muito superior, inclusive quando cultivado sem aporte de fertilizantes.

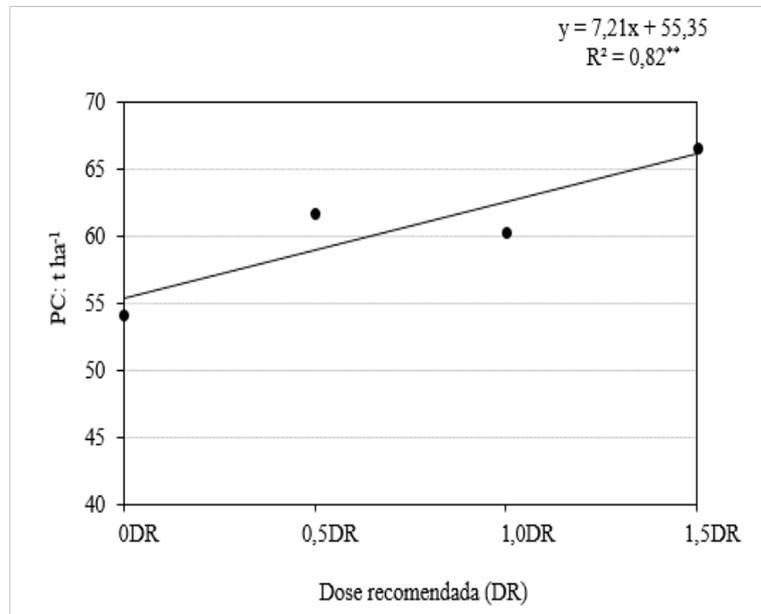


Figura 9. Gráfico da regressão ajustada da produtividade de colmos (PC, t ha⁻¹) em função de doses de NPK de sorgo sacarino cultivado em solo de fertilidade construída (Araras, SP, safra 2015/2016).

O modelo matemático linear foi ajustado com alto coeficiente de determinação (Figura 9), em que 82% da variação da produtividade de colmos foi explicada pelas doses crescentes de NPK. O sorgo sacarino apresentou aumento de produtividade à medida que houve incremento de doses de NPK, com a maior produtividade estabelecida em 1,5DR. Pelo modelo, a opção por não adubar resultaria em uma PC de 55,35 t ha⁻¹, próxima à obtida experimentalmente (54,20 t ha⁻¹). Devido à falta de ajuste do modelo quadrático (p-valor = 0,79), não foi possível estabelecer a dose de produtividade máxima econômica através da derivação da equação quadrática.

Embora a dose de maior eficiência agrônômica tenha sido a 1,5DR (165-120-175 kg ha⁻¹ de NPK), é necessária a análise da viabilidade econômica da aplicação de fertilizantes, principalmente em solo de fertilidade construída (RESENDE et al., 2016). Com base nas produtividades obtidas, a decisão por não adubar o sorgo sacarino é a que resultaria no melhor retorno econômico (Tabela 10). A aplicação de fertilizantes seria vantajosa se a produtividade em 0DR fosse menor que 51, 40 e 36 t ha⁻¹ respectivamente para as doses de 0,5DR (55-40-60 kg de NPK ha⁻¹), DR (110-80-120 kg de NPK ha⁻¹) e 1,5DR (165-120-180 kg de NPK ha⁻¹).

Tabela 10. Análise econômica da aplicação de fertilizantes NPK para a cultura do sorgo sacarino cultivado em solo de fertilidade construída (Araras, SP, safra 2015/2016).

R\$ ha ⁻¹	0DR	0,5DR	1,0DR	1,5DR
	0 kg de NPK ha ⁻¹	55-40-60 kg de NPK ha ⁻¹	110-80-120 kg de NPK ha ⁻¹	165-120-180 kg de NPK ha ⁻¹
Produtividade (t ha ⁻¹)	54,20	61,76	60,37	66,68
¹ Receita Bruta	R\$ 3.512,16	R\$ 4.002,05	R\$ 3.911,98	R\$ 4.320,86
² Custo fertilizante	-	R\$ 633,95	R\$ 1.267,90	R\$ 1.901,85
³ Custo adubação	-	R\$ 47,67	R\$ 47,67	R\$ 47,67
Receita Líquida	R\$ 3.512,16	R\$ 3.320,43	R\$ 2.596,41	R\$ 2.371,34
Diferença em relação a receita de ODR		-R\$ 191,73	-R\$ 915,75	-R\$ 1.140,82

¹Considerando o preço da cana-de-açúcar de R\$ 64,80 t⁻¹, referente ao mês de junho de 2018 (IEA, 2018).

²Preços fertilizantes (junho de 2018): nitrato de amônio R\$ 0,82 kg⁻¹ (INTL-FC STONE, 2018); supersimples: R\$1,28 kg⁻¹; e cloreto de potássio R\$ 1,99 kg⁻¹ (IEA, 2018).

³ Custos de mão-de-obra e de trator para a adubação de cobertura, conforme May et al. (2013), corrigidos pelo IGP-M (setembro de 2013 a junho de 2018) (FGV, 2018).

Lacerda et al. (2015) conduziram experimento em uma fazenda produtora de grãos situada no noroeste de Minas Gerais, onde o solo tem sido cultivado há 15 anos em sistema de plantio direto, com fertilidade considerada de adequada a alta para a região do Cerrado (teor de M.O. de 32 g dm⁻³, P e K (Mehlich-1) de 12 mg dm⁻³ e 3,71 mmolc dm⁻³, respectivamente). Realizaram três cultivos de verão de sequeiro, na sequência de rotação soja-milho-soja, sendo que os tratamentos consistiram de 0, 50, 100 e 150% das doses de fertilizantes NPK aplicadas pelo produtor. O milho foi mais sensível à redução da adubação, sendo que a dose utilizada na fazenda para a semeadura do milho (359 kg ha⁻¹ da fórmula NPK 10-32-10) poderia ser reduzida em 47 kg ha⁻¹ (13%), em razão da dose de máxima eficiência econômica ter sido de 312 kg ha⁻¹. Quanto a adubação nitrogenada de cobertura, poderia ser reduzida a aplicação de 350 kg ha⁻¹ para 263 kg ha⁻¹, ou em 25%. A soja não apresentou decréscimo de produtividade devido à ausência de adubação, assim como o sorgo sacarino neste estudo.

4.1.2. Avaliações biométricas

No tocante a biomassa verde (BV) e biomassa seca (BS), os resultados dos tratamentos combinados variaram entre 66,39 e 101,97 t ha⁻¹ para BV e de 15,68 e 31,14 t ha⁻¹ para BS (Tabela 11). As médias das épocas de colheita apresentaram diferença estatística para as duas variáveis, enquanto somente a BV respondeu significativamente às doses crescentes de NPK (Tabela 8).

Tabela 11. Biomassa verde (BV) e biomassa seca (BS) de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliado em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).

BV (t ha ⁻¹)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (dose)
0DR	66,39 ^{±9,00}	85,29 ^{±5,72}	77,78 ^{±3,43}	76,70 ^{±3,98}	75,54^{±3,14} b
0,5DR	77,81 ^{±5,79}	96,76 ^{±4,85}	83,94 ^{±6,71}	81,79 ^{±8,41}	85,08^{±3,43} ab
1,0DR	86,36 ^{±7,52}	93,80 ^{±3,95}	82,59 ^{±6,62}	69,27 ^{±6,36}	82,25^{±3,50} ab
1,5DR	86,59 ^{±5,39}	101,97 ^{±8,53}	94,09 ^{±10,39}	82,36 ^{±4,93}	91,25^{±3,91} a
Média (DAE)	78,54^{±3,69} b	94,45^{±3,09} a	83,60^{±3,70} ab	77,53^{±3,07} b	
DMS ExD= 24,93		DMS Dx E= 26,00		DMS D= 12,38	DMS E= 13,00
BS (t ha ⁻¹)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (dose)
0DR	15,68 ^{±2,64}	28,68 ^{±3,47}	24,46 ^{±1,48}	25,32 ^{±1,22}	23,53^{±6,94} a
0,5DR	18,80 ^{±1,21}	30,52 ^{±1,56}	26,32 ^{±1,73}	26,63 ^{±3,18}	25,57^{±6,07} a
1,0DR	20,63 ^{±1,93}	28,04 ^{±1,41}	26,50 ^{±1,29}	21,53 ^{±1,43}	24,18^{±4,52} a
1,5DR	19,55 ^{±1,34}	31,14 ^{±2,35}	28,86 ^{±2,81}	25,33 ^{±0,54}	26,22^{±6,04} a
Média (DAE)	18,67^{±0,95} c	29,60^{±1,14} a	26,54^{±0,95} ab	24,70^{±0,96} b	
DMS ExD= 7,65		DMS Dx E= 7,63		DMS D= 4,40	DMS E= 3,82

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Numeração sobrescrita indica o erro padrão da média.

BV: biomassa verde; BS: biomassa seca; DR: dose recomendada; DAE: dias após emergência; DMS: diferença mínima significativa; Dx E: desdobramento da dose dentro de épocas de colheita; ExD: desdobramento da época de colheita dentro de doses; D: dose.

O fato de BV ter respondido à adubação, diferentemente de BS, pode estar relacionado ao conteúdo de umidade, que compõe a massa do caldo. As plantas de sorgo, cultivadas na dose 1,5DR (165-120-180 kg de NPK ha⁻¹) foram aquelas que apresentaram maiores médias de biomassa verde (Tabela 11; Figura 10-A). Doses superiores de K, que é um importante regulador osmótico, podem ter contribuído para que as plantas de sorgo respondessem melhor à perda de água (ANDERSEN; JENSEN; LÖSCH, 1992). Vilela; Bull (1999) observaram que as folhas de plantas de milho se ajustaram osmoticamente com aumento de doses de K, em

situação de estresse hídrico moderado, porém este ajuste não causou diferenças significativas na matéria seca das plantas, corroborando com a observação deste estudo.

Plantas colhidas aos 105DAE apresentaram maiores médias de BV e BS, respectivamente (Tabela 11), quando o sorgo sacarino se encontrava no EC3 (estádio de grão leitoso, quando ocorre a formação dos grãos, conforme Figura 2). Através da equação de regressão, pode-se verificar que a época de colheita em que houve acúmulo máximo de BV e BS ocorreu em 111 e 116DAE, respectivamente (Figura 10-B; Figura 10-C). Cavalcante (2017), estudando a marcha de absorção e acúmulo de macro e micronutrientes no sorgo sacarino Malibu 5010 em Rio Verde-GO, mesmo material genético testado neste experimento, verificou que este híbrido apresentou ciclo de desenvolvimento de 93 dias até a sua colheita, quando atingiu ° Brix de 16,07, altura de 2,71 m, diâmetro de colmo de 2,1 cm, massa fresca de 93,09 t ha⁻¹ e de massa seca de 43,77 t ha⁻¹.

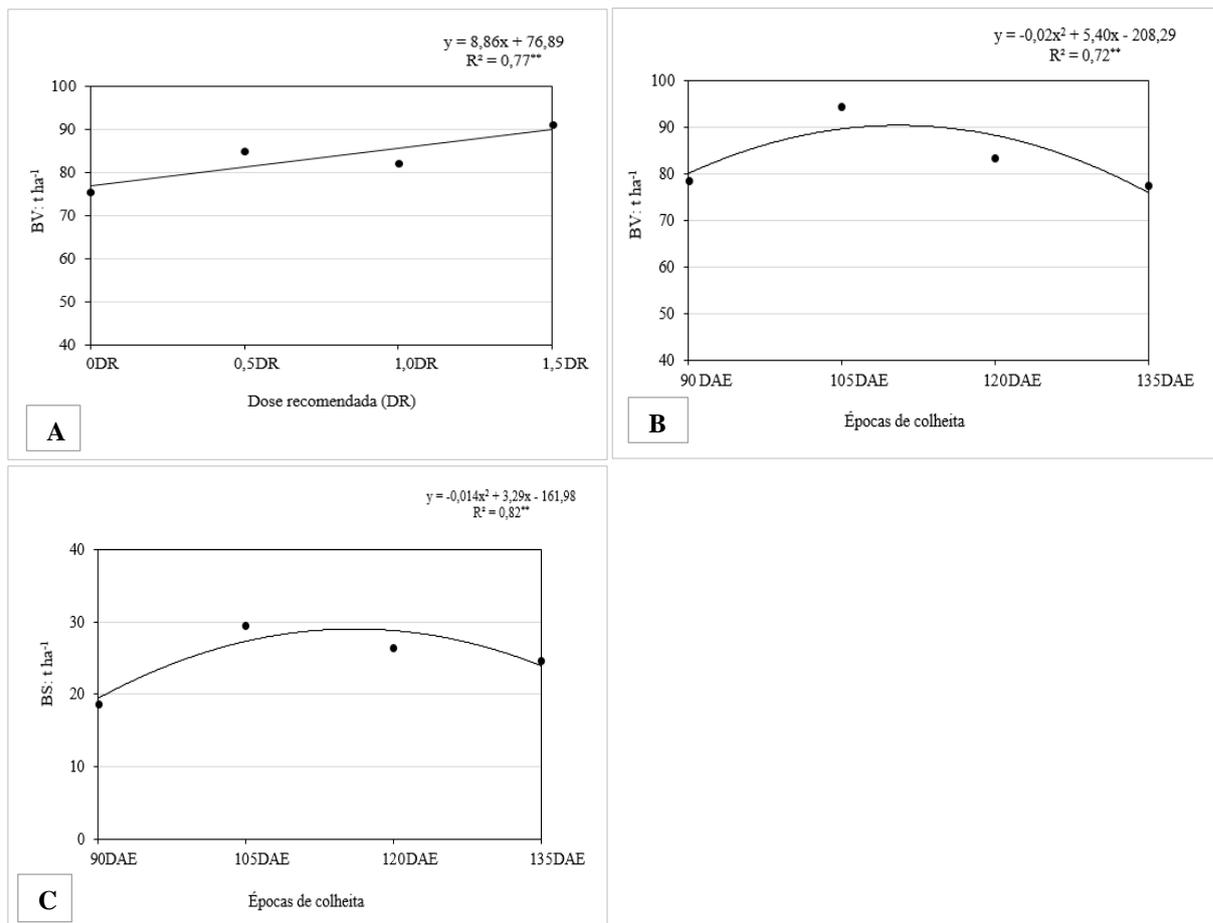


Figura 10. Gráfico da regressão ajustada da BV em função de doses de NPK (A) e épocas de colheita (B); gráfico da regressão ajustada da BS em função das épocas de colheita testadas (C) (Araras, SP, safra 2015/2016).

As diferenças entre os resultados obtidos por Calvalcante (2017) e deste estudo podem ser resultantes da sensibilidade de características de crescimento a muitas variáveis meteorológicas como a temperatura, radiação global líquida, umidade relativa do ar e precipitação, que estão intimamente relacionadas à disponibilidade hídrica e à fotossíntese, além da própria fertilidade do solo. Trabalhos como o de Carlucci; Ramos (1989) revelaram que o déficit hídrico contribui para o acúmulo de sacarose na cana-de-açúcar. Porém, quando ocorre déficit por períodos prolongados, a tonelada de colmo produzida por hectare decresce, sobretudo em função da evapotranspiração, que reduz a quantidade de água presente no colmo, resultando em chochamento.

Os dados climáticos registrados no intervalo de quinze dias antes de cada colheita (Tabela 12) indicaram que, em poucos dias, houve grande variabilidade de precipitação (Figura 6), de demanda evaporativa pela atmosfera, de incidência de radiação solar e de temperatura. Castro; Kluge; Sestari (2008) afirmaram que, especialmente para o sorgo, altas intensidades luminosas, temperaturas médias em torno de 26°C e disponibilidade hídrica promovem acúmulo considerável de fitomassa. Estas condições foram favoráveis ao sorgo durante boa parte do seu ciclo (Figura 5; Figura 6), com exceção dos meses de abril e maio, que concentraram maior parte das avaliações de colheita.

Tabela 12. Dados climáticos quinzenais registrados durante as épocas de colheita do sorgo sacarino cultivado em solo de fertilidade construída (Araras, SP, safra 2015/2016).

Variáveis climáticas	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE
Precipitação ac. (mm)	73,91	11,43	6,86	8,89
ETo ac. (mm)	53,81	61,06	53,66	31,46
Radiação Líquida ac. (MJ m ⁻²)	154,91	167,97	136,48	78,44
Temperatura média (°C)	23,70	25,27	24,90	18,42
UR média (%)	89,90	82,50	78,90	84,60

DAE: dias após a emergência; ac.: acumulada; ETo: evapotranspiração de referência, método de Penman-Monteith; MJ: MegaJoule; UR: umidade relativa do ar.

* compreende o período de 15 dias antes da colheita em 90 DAE.

As variáveis diâmetro do colmo e número de entrenós (NE) apresentaram diferenças significativas apenas entre as épocas de colheita. A massa seca da panícula respondeu significativamente à doses crescentes de NPK e épocas de colheita. A altura das plantas foi a única variável de crescimento que não foi influenciada pela adubação e o tempo de colheita, indicando ser uma característica mais sensível a questões de ordem genética do que propriamente ao ambiente de cultivo (Tabela 8).

A média de altura das plantas dos tratamentos combinados (Tabela 13) situou-se entre 2,88 a 3,04 m, superior ao reportado por Cavalcante (2017) (2,71 m), enquanto os valores médios de diâmetro do colmo obtidos neste experimento (de 13,12 a 16,94 mm) foram bem inferiores aos 21 mm observados pelo mesmo autor, o que pode também estar relacionado com as condições climáticas e agrônômicas, como espaçamento e densidade de plantas por hectare.

Tabela 13. Médias de altura, número de entrenós (NE) e diâmetro de colmos de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliados em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).

Altura (m)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (dose)
0DR	2,91 ^{±0,03}	2,99 ^{±0,12}	3,02 ^{±0,02}	3,04 ^{±0,11}	2,99^{±0,18} a
0,5DR	2,88 ^{±0,07}	2,97 ^{±0,06}	2,99 ^{±0,03}	2,94 ^{±0,05}	2,95^{±0,12} a
1,0DR	2,97 ^{±0,07}	2,90 ^{±0,08}	3,00 ^{±0,05}	3,02 ^{±0,09}	2,97^{±0,15} a
1,5DR	2,99 ^{±0,06}	3,00 ^{±0,10}	2,99 ^{±0,06}	3,03 ^{±0,03}	3,00^{±0,14} a
Média (DAE)	2,94^{±0,12} A	2,96^{±0,20} A	3,00^{±0,09} A	3,01^{±0,16} A	
DMS Dx E= 1,34		DMS Ex D= 1,41		DMS D= 0,63	
				DMS E= 0,13	
Diâmetro (mm)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (dose)
0DR	16,94 ^{±0,61}	14,77 ^{±0,79}	13,12 ^{±0,59}	13,67 ^{±0,58}	14,62^{±2,00} a
0,5DR	15,25 ^{±1,20}	13,30 ^{±0,61}	13,99 ^{±0,47}	13,55 ^{±0,25}	14,02^{±1,67} a
1,0DR	15,84 ^{±0,68}	14,56 ^{±0,63}	13,51 ^{±0,48}	13,26 ^{±0,41}	14,29^{±1,55} a
1,5DR	16,01 ^{±0,81}	13,39 ^{±0,57}	12,90 ^{±0,62}	14,01 ^{±0,53}	14,08^{±1,79} a
Média (DAE)	16,00^{±0,42} A	14,00^{±0,34} B	13,38^{±0,27} B	13,62^{±0,22} B	
DMS Ex D= 2,38		DMS Dx E= 2,58		DMS D= 0,95	
				DMS E= 1,29	
NE (entrenós planta ⁻¹)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (dose)
0DR	10,23 ^{±0,45}	11,01 ^{±0,67}	11,02 ^{±0,20}	10,92 ^{±0,25}	10,80^{±0,73} a
0,5DR	9,87 ^{±0,44}	10,94 ^{±0,37}	10,86 ^{±0,26}	10,68 ^{±0,39}	10,59^{±1,06} a
1,0DR	10,22 ^{±0,15}	10,54 ^{±0,50}	10,72 ^{±0,22}	10,91 ^{±0,31}	10,60^{±0,50} a
1,5DR	10,20 ^{±0,28}	10,78 ^{±0,45}	10,80 ^{±0,26}	10,70 ^{±0,19}	10,62^{±0,62} a
Média (DAE)	10,13^{±0,16} B	10,82^{±0,24} AB	10,85^{±0,11} A	10,81^{±0,14} AB	
DMS Ex D= 1,34		DMS Dx E= 1,41		DMS D= 0,63	
				DMS E= 0,70	

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna e maiúsculas na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância. Numeração sobrescrita indica o erro padrão da média.

NE: número de entrenós; DR: dose recomendada; DAE: dias após emergência; DMS: diferença mínima significativa; Dx E: desdobramento da dose dentro de épocas de colheita; Ex D: desdobramento da época de colheita dentro de doses; D: dose; E: época de colheita.

Em cana-de-açúcar, a altura da planta tem correlação positiva com o número de entrenós que, juntamente com o diâmetro do colmo, estão diretamente relacionadas ao acúmulo de sacarose (MARAFON, 2012). No sorgo sacarino, embora o NE tenha diferido entre as épocas

de colheita (Tabela 13), não houve reflexo correspondente na altura, o que sugere menor alongamento do entrenós nas plantas que apresentaram maior número desta variável. O modelo de regressão ajustado (Figura 11-A) explicou satisfatoriamente a variação do NE em função das épocas de colheita ($R^2=59\%$), com percentual de erro de predição maior para 90DAE (10,17%) em relação a 105DAE (2,31%), 120DAE (0,65%) e 135DAE (1,67%). O diâmetro do colmo decresceu com adiamento da colheita (Figura 10-B), sendo que a média mais elevada foi obtida aos 90DAE (Tabela 13).

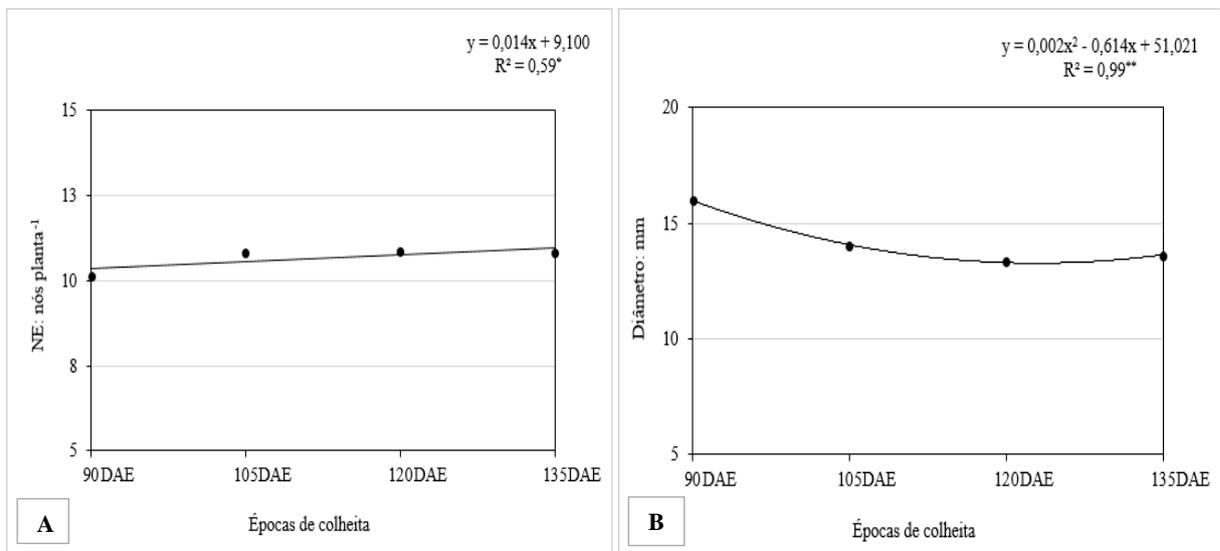


Figura 11. Gráficos da regressão ajustada do número de entrenós (NE) (A) e do diâmetro de colmos (B) em função das épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).

Na literatura, diferentemente dos resultados obtidos neste experimento, há estudos que mostraram respostas significativas de altura, diâmetro e biomassa verde à adubação, sobretudo a nitrogenada e potássica. Almodares et al. (2008) testaram o efeito de doses de N (0; 90 e 180 kg ha⁻¹ de ureia) e de K (0 e 50 kg ha⁻¹ de K₂O) em dois cultivares de sorgo sacarino (Rio e Keller) no Irã e observaram que a aplicação de 180 kg ha⁻¹ de ureia e de 50 kg ha⁻¹ de K₂O resultou em maiores médias de altura (2,7 m) e de biomassa fresca (130 t ha⁻¹) para os dois cultivares estudados. Entretanto, Lara et al. (2015), avaliando o desempenho agrônômico de dois cultivares de sorgo sacarino (BRS 506 e BRS 509) sob diferentes doses de N e K em cobertura, em Sete Lagoas-MG, não observaram a influência da adubação na altura de plantas e no diâmetro de colmo, também devido a alta fertilidade do solo.

A massa seca da panícula (MSP) foi o parâmetro biométrico investigado para expressar a interferência da adubação sobre a base para fabricação de etanol a partir da fração amilácea

do sorgo sacarino. Os resultados mostraram que este indicador foi sensível, de maneira isolada, aos diferentes níveis de doses de NPK e de épocas de colheita (Tabela 8). Os tratamentos combinados tiveram médias situadas entre 61,46 e 185,31 g m⁻¹, cuja variabilidade esteve mais associada às épocas de corte (Tabela 8; Tabela 14). A média superior em 105 DAE (Tabela 14) pode estar relacionada à fenologia do sorgo, uma vez que esta época coincidiu com o estágio 7, fase conhecida pelo enchimento dos grãos, fase de maior umidade nos grãos (Figura 2). O modelo de regressão ajustado, que explicou 79 % da variação da MSP em função das épocas de corte, indicou que aos 110 DAE ocorreu acúmulo máximo de MSP (Figura 12-B). Quanto à adubação, a MSP foi maior em 0DR (Figura 12-A).

Tabela 14. Massa seca da panícula (MSP) de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliada em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).

MSP (g m ⁻¹)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (dose)
0DR	68,09 (8,17) ^{±11,38}	185,31 (13,48) ^{±26,89}	113,13 (10,98) ^{±13,12}	77,45 (8,78) ^{±8,32}	113,12 (10,35)^{±13,05} a
0,5DR	81,81 (9,05) ^{±5,51}	179,59 (13,38) ^{±13,65}	107,08 (10,34) ^{±8,29}	72,76 (8,52) ^{±6,97}	110,31 (10,32)^{±10,49} ab
1,0DR	87,80 (9,18) ^{±16,41}	127,03 (11,26) ^{±10,02}	99,35 (9,98) ^{±5,07}	55,28 (7,41) ^{±6,68}	92,36 (9,47)^{±7,61} b
1,5DR	84,56 (9,23) ^{±8,23}	168,18 (12,88) ^{±22,03}	107,73 (10,34) ^{±11,43}	61,46 (7,80) ^{±8,21}	105,48 (10,06)^{±11,07} a
Média (DAE)	80,57 (8,91)^{±5,40} C	165,03 (12,75)^{±10,30} A	108,95 (10,41)^{±4,93} B	66,74 (8,13)^{±4,02} C	
DMS ExD= 47,31 (2,15) DMS Dx E= 50,90 (2,32) DMS D= 20,11(0,87) DMS E= 25,45 (1,16)					

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna e maiúsculas na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância. Numeração sobrescrita indica o erro padrão da média. Valores entre parênteses refletem a média transformada, conforme metodologia de Box e Cox (1964).

MSP: massa seca da panícula; DR: dose recomendada; DAE: dias após emergência; DMS: diferença mínima significativa; Dx E: desdobramento da dose dentro de épocas de colheita; ExD: desdobramento da época de colheita dentro de doses.

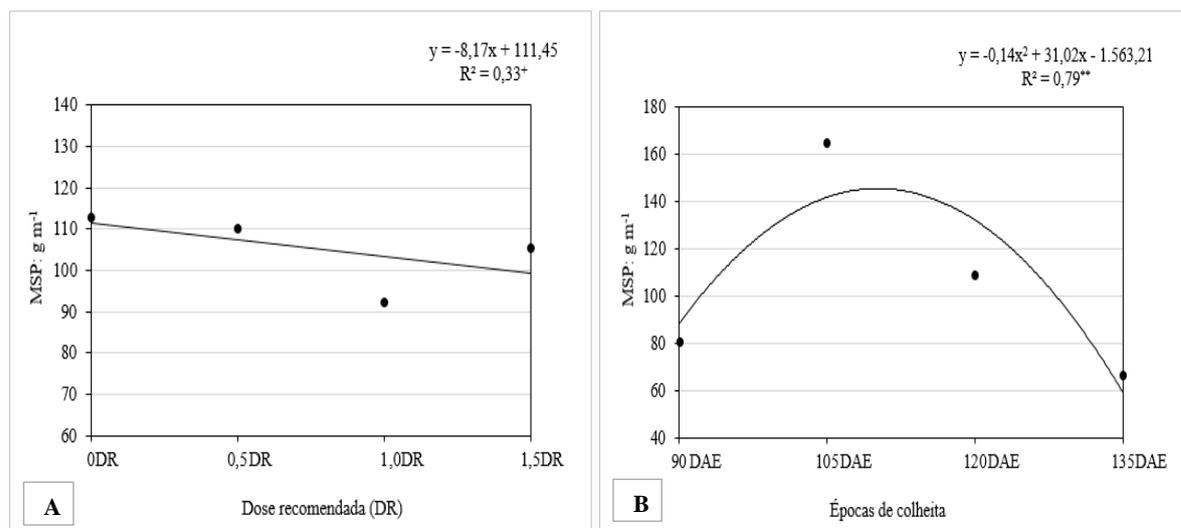


Figura 12. Gráfico da regressão ajustada à MSP em função das doses de NPK (A); gráfico da regressão ajustada à MSP em função das épocas de colheita (B) (Araras, SP, safra 2015/2016).

Em síntese, as variáveis de crescimento do sorgo sacarino apresentaram melhor desempenho técnico na dose de 1,5DR (165-120-180 kg de NPK ha⁻¹) e colheita aos 105DAE. No entanto, ficou evidente que a fertilidade construída do solo foi suficiente para gerar produtividade com máximo retorno econômico. Nos Estados Unidos, Mosali et al. (2010) estudaram os efeitos de doses crescentes de N na produção de biomassa e de caldo de dois cultivares de sorgo sacarino. Após dois anos de estudos, os autores concluíram que, se houver N residual no solo, taxas crescentes de aplicação de fertilizantes nitrogenados não terão efeitos significativos sobre a produção de biomassa e de caldo.

A Tabela 15 traz um indicativo teórico da estocagem de nutrientes no solo antes do cultivo do sorgo sacarino, desconsiderando as perdas que podem ocorrer no ambiente agrícola. No tratamento sem adubação, a quantidade de N fornecida pelo solo esteve pouco abaixo daquela recomendada para solos com baixa disponibilidade de nutrientes, ou de alta resposta à adubação (140-80-160 kg ha⁻¹ de NPK), enquanto as quantidades de P e de K estiveram acima (BOLONHEZI; FREITAS; SAWAZAKI, 2014).

Tabela 15. Quantidades teóricas de nutrientes na camada de 0 a 20 cm de profundidade, fornecidos ao sorgo sacarino cultivar Malibu 5010, cultivado com doses crescentes de NPK (Araras, SP, safra 2015/2016).

Tratamento	Quantidade teórica de nutrientes aportados					
	kg ha ⁻¹					
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	B	Zn
* 0DR	¹ 104	² 172	³ 340	⁴ 58	2,2	7
0,5DR	159	212	400	84	2,2	7
1,0DR	214	252	460	110	2,2	7
1,5DR	269	292	520	136	2,2	7

* considerando a fertilidade inicial do solo, conforme Tabela 4.

¹ N estimado pela relação 1 dag kg⁻¹ de M.O = 30 kg de N ha⁻¹ (Sousa; Lobato, 2004).

² K x 1,205 = K₂O; 1 mmolc dm⁻³ = 39,102 mg dm⁻³

³ P x 2,293 = P₂O₅

⁴ quantidades variaram em função da fonte de P₂O₅, o superfosfato simples (11% de S).

Havia a expectativa, sobretudo para o excesso de N, de prolongamento dos estádios vegetativos e, conseqüentemente, atraso na maturação, como foi observado em milho por Amanullah et al. (2007) e em cana-de-açúcar por Silveira (1980) e por Rodrigues (1995). Contudo, Santos et al. (2013) comentaram em seu estudo que, pela quantidade extraída de nutriente por tonelada de matéria seca produzida, o sorgo sacarino necessitaria de 280 kg de N, 80 kg de P₂O₅ e 420 kg de K₂O para uma produtividade média de 35 t ha⁻¹, o que seria inviável do ponto de vista econômico. Os autores relataram que as altas extrações de N e de K estão relacionadas ao consumo de luxo, ou seja, quando a disponibilidade de NO₃⁻ e de K⁺ é muito elevada, estes elementos são absorvidos em excesso, e podem ser acumulados no vacúolo para

posterior utilização ou ser translocados através dos tecidos sem efeitos prejudiciais à planta (LEA; BLACKWELL; JOY, 1992). Neste estudo, o comportamento do híbrido Malibu 5010 quanto a extração de nutrientes será discutido mais adiante. Contudo, pelos resultados apresentados, as variáveis de crescimento do sorgo sacarino não foram afetadas por altas doses de NPK.

4.2. Avaliação da qualidade industrial do sorgo sacarino

Efeitos significativos da interação entre as doses de NPK e as épocas de colheita foram observados para o teor de sacarose do caldo (Pol), pureza, açúcares redutores (AR) e açúcares totais recuperáveis (ATR), validando a hipótese de que a época de colheita do sorgo sacarino depende da quantidade de NPK ofertada, quanto as características relacionadas à qualidade industrial. No entanto, esta dependência não foi constatada para o teor de sólidos solúveis (Brix), teor de fibra e rendimento de etanol (RE), em que apenas os níveis do fator época de colheita apresentaram médias estatisticamente diferentes. Os coeficientes de variação situaram-se entre 2 e 23%, com maior amplitude para o fator época de colheita, o que sugere uma boa precisão experimental, para condições de campo. Os modelos polinomiais de regressão também seguiram este padrão (Tabela 16).

Tabela 16. Análise de variância (ANOVA) e análise de regressão de variáveis tecnológicas de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliadas em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).

ANOVA: p-valor do teste F								
FV	gl	Brix	Pol	Pureza	Fibra	AR	ATR	RE
Bloco	4	0,18 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,48 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,53 ^{ns}
Dose (D)	3	0,42 ^{ns}	<0,01 ^{**}	<0,01 ^{**}	0,76 ^{ns}	<0,01 ^{**}	<0,01 ^{**}	0,15 ^{ns}
Época colheita (E)	3	<0,01 ^{**}						
D x E	9	0,22 ^{ns}	<0,01 ^{**}	<0,01 ^{**}	0,45 ^{ns}	<0,01 ^{**}	<0,01 ^{**}	0,87 ^{ns}
ANOVA da regressão								
Dose (D)	1	ns	Q ^{**}	Q ^{**}	ns	Q ^{**}	Q ^{**}	ns
Época colheita (E)	1	L [*]	Q ^{**}	L ^{**}	L [*]	L ^{**}	L ^{**}	L ^{**}
D x E	1	ns	Q ^{**}	Q ^{**}	ns	L [*]	Q ^{**}	ns
CV% (D)		2,33%	8,53%	9,83%	5,16%	6,35%	5,58%	11,03%
CV% (E)		13,00%	22,81%	18,53%	7,71%	11,97%	12,26%	13,74%
Norm. (teste S-W)		0,07	0,53	0,28	0,07	0,28	0,53	0,53

FV: fonte de variação; gl: grau de liberdade; ns: não significativo; *significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; **significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. L: ajuste de regressão linear; Q: ajuste de regressão quadrática.

AR: açúcares recuperáveis; ATR: açúcar total redutor; RE: rendimento de etanol; CV%: coeficiente de variação; Norm.: normalidade; teste S-W: teste de Shapiro-Wilk.

Rao (2013) estudou a influência da adubação nitrogenada (60, 90, 120 e 150 kg ha⁻¹ de N) e potássica (40 e 80 kg ha⁻¹ de K₂O) sobre o ponto ótimo de colheita (nos estádios de 50% de florescimento, grão duro e maturação fisiológica) do sorgo sacarino em condições de campo na Índia. Ao contrário dos resultados encontrados neste experimento, o autor não encontrou efeitos significativos da interação entre os estádios de colheita e as práticas de manejo de nutrientes para o conteúdo de sacarose, pureza, açúcares redutores e açúcares totais do caldo. Quanto aos efeitos isolados da adubação e estádio de colheita, as variáveis responderam de forma significativa para ambos os fatores.

No que diz respeito ao teor de sólidos solúveis (°Brix), os resultados dos tratamentos combinados variaram entre 9,00 e 11,80% (Tabela 16) e estiveram aquém de 15 a 19% conforme orienta Pacheco (2012). Valores abaixo dos recomendados foram observados para várias características analisadas e serão discutidos mais adiante.

Tabela 17. Médias de °Brix, teor de fibra e rendimento de etanol (RE) de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliado em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).

°Brix (%)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (dose)
0DR	10,00 ^{±0,65}	9,58 ^{±0,73}	10,72 ^{±0,44}	10,98 ^{±0,86}	10,32^{±0,34} a
0,5DR	10,48 ^{±0,66}	9,54 ^{±0,44}	11,64 ^{±0,27}	11,65 ^{±0,99}	10,78^{±0,34} a
1,0DR	10,10 ^{±0,73}	11,30 ^{±0,76}	11,80 ^{±0,68}	10,22 ^{±0,54}	10,86^{±0,35} a
1,5DR	9,54 ^{±0,39}	9,00 ^{±0,40}	12,04 ^{±0,74}	9,72 ^{±0,30}	10,08^{±0,36} a
Média (DAE)	10,03^{±0,30} B	9,86^{±0,34} B	11,55^{±0,28} A	10,59^{±0,35} AB	
DMS ExD = 2,36		DMS Dx E = 2,29		DMS D = 1,46	DMS E = 1,15
Fibra (%)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (Dose)
0DR	12,26 ^{±0,23}	12,20 ^{±0,44}	13,19 ^{±0,49}	13,18 ^{±0,55}	12,71^{±0,23} a
0,5DR	12,26 ^{±0,18}	12,84 ^{±0,49}	13,68 ^{±0,54}	13,30 ^{±0,66}	13,00^{±0,25} a
1,0DR	12,25 ^{±0,61}	12,88 ^{±0,54}	14,35 ^{±0,91}	12,64 ^{±0,25}	13,03^{±0,34} a
1,5DR	12,59 ^{±0,41}	11,53 ^{±0,30}	13,37 ^{±0,47}	12,92 ^{±0,43}	12,60^{±0,25} a
Média (DAE)	12,34^{±0,18} B	12,36^{±0,24} B	13,65^{±0,30} A	13,00^{±0,22} AB	
DMS ExD = 1,92		DMS Dx E = 1,67		DMS D = 1,41	DMS E = 0,84
RE (L ha ⁻¹)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (dose)
0DR	1.869,56 ^{±299,42}	2.076,57 ^{±194,49}	2.416,88 ^{±132,26}	2.155,96 ^{±247,94}	2.129,75^{±113,53} a
0,5DR	2.011,67 ^{±137,10}	2.153,80 ^{±214,27}	2.789,29 ^{±240,91}	2.871,07 ^{±282,03}	2.434,44^{±130,08} a
1,0DR	1.764,84 ^{±114,12}	2.416,34 ^{±345,77}	2.715,45 ^{±325,43}	2.680,77 ^{±412,16}	2.394,35^{±170,73} a
1,5DR	1.835,00 ^{±153,54}	1.709,44 ^{±185,38}	2.295,67 ^{±320,44}	2.179,51 ^{±259,64}	2.004,91^{±125,84} a
Média (DAE)	1.870,27^{±89,78} B	2.088,86^{±125,98} AB	2.554,32^{±130,96} A	2.450,82^{±155,49} A	
DMS ExD = 972,97		DMS Dx E = 970,30		DMS D = 565,26	DMS E = 488,33

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Numeração sobrescrita indica o erro padrão da média.

RE: rendimento de etanol; DR: dose recomendada; DAE: dias após emergência; DMS: diferença mínima significativa; Dx E: desdobramento da dose dentro de épocas de colheita; ExD: desdobramento da época de colheita dentro de doses; E: época de colheita.

A baixa qualidade industrial do híbrido Malibu 5010 pode ser explicada por dois eventos importantes: a) condições climáticas desfavoráveis durante a fase de emborrachamento (Figura 5). Na fase de emissão da folha bandeira, a aplicação do inibidor de florescimento ethephon é importante não apenas para retardar o florescimento, evitando assim a redistribuição de açúcares para as panículas, como também para evitar a proliferação do fungo causador da doença açucarada (*Claviceps africana*). Neste período houve precipitação praticamente todos os dias (média de 9 mm dia⁻¹; Figura 5, 3ª decêndio de fevereiro), provocando atraso na aplicação do inibidor de florescimento e diminuindo sua eficácia; b) na fase de floração (EC2, Figura 5, 1º decêndio de março), houve condições climáticas favoráveis (temperatura mínima de 19°C +1°C e umidade relativa acima de 80%) para a proliferação de *Claviceps africana*, em todas as parcelas experimentais (PINTO; FERREIRA; CASELA, 1997). Este fungo transporta os açúcares contidos no colmo para a panícula (Figura 13), reduzindo a quantidade disponível para o processamento industrial (ROBERTO, 2013).



Figura 13. Doença açucarada do sorgo ou *Ergot*, causada por (*Claviceps africana*). (A) Exsudação de açúcares nas panículas, (B) desenvolvimento saprofítico sobre os açúcares, com aspecto de carvão sobre as panículas.

Fonte: May et al. (2013).

Bolonhezi et al. (2015) avaliaram características tecnológicas de genótipos de sorgo sacarino BRS 511, Blade Sacarino A, Blade Biomassa A e Blade Biomassa B, em ensaios de campo na região de Ribeirão Preto, safra 2014/2015. O caldo também foi extraído pela metodologia Consecana. A alta incidência de *Ergot* no híbrido Blade Sacarino A impediu que este genótipo expressasse seu potencial sacarino, cujo acúmulo de açúcares foi semelhante aos

genótipos de biomassa. Os autores explicaram que os esporos do fungo *Claviceps africana* competem com os grãos de pólen para alcançar os estigmas das flores. No genótipo BRS 511, que apresenta fluxo de pólen mais longo e em maior quantidade, a severidade da doença foi baixa, garantindo o acúmulo de açúcares. No referido estudo, os híbridos Blade tiveram comportamento semelhante aos observados neste experimento, com média de 7,4% de °Brix e ATR de 38,8 kg t⁻¹.

Plantas colhidas em 120DAE tiveram maior incremento de sólidos solúveis (°Brix) no caldo (Tabela 17), correspondente ao estágio de maturação fisiológica. Segundo Teixeira et al. (1999), ao contrário da cana-de-açúcar, o sorgo sacarino acumula açúcares no colmo durante o estágio reprodutivo, sobretudo na fase de maturidade fisiológica dos grãos. Embora os valores de °Brix tenham sido ajustados pelo modelo de regressão linear (Figura 14-A), sua variabilidade pode ser limitadamente explicada em função das épocas de colheita (R²=33%).

Quanto ao teor de fibra, os resultados dos tratamentos combinados situaram-se entre 11,53 e 13,68% (Tabela 17), podendo considerá-los dentro dos limites desejados pela indústria, de 12 a 20% (Pacheco, 2012). Para a produção de etanol, quanto menor o teor de fibra, maior é a eficiência da extração do caldo pela moenda (Pacheco, 2012). As épocas de colheita que proporcionaram menores teores de fibra no colmo do sorgo sacarino foram em 90 e 105DAE (Tabela 17). Foi ajustado o modelo de regressão linear (Figura 14-B), mas as épocas de colheita explicaram apenas 42% da variabilidade dos valores de °Brix, o que pode estar relacionado ao fato de que o teor de fibra é normalmente mais influenciado por características genéticas do híbrido do que por fatores ambientais.

O rendimento de etanol variou de 1.709 a 2.871 L ha⁻¹, abaixo dos 3.500 L ha⁻¹ do sugerido por May et al. (2013) e que seria compatível com uma produção de colmos de 50 t ha⁻¹. Em função dos baixos valores de açúcares totais recuperáveis (ATR), como será discutido mais adiante, esperava-se um rendimento de etanol ainda menor. No entanto, os resultados foram satisfatórios em virtude do cálculo do rendimento de etanol envolver a quantidade de suco produzida, sendo este parâmetro não afetado pela doença açucarada, diferentemente do teor de sólidos solúveis. Rendimentos superiores foram obtidos quando as plantas de sorgo sacarino foram colhidas em 120 e 135DAE (Tabela 17). A equação de regressão ajustou-se significativamente (p>0,05) ao modelo linear, explicando 80% da variação do rendimento do etanol em função das épocas de colheitas (Figura 14-C). Caso o sorgo sacarino tivesse atingido 16 °Brix, como obteve Cavalcante (2017) para o mesmo híbrido aqui testado, e considerando

uma extração de caldo mínima de 45 t ha^{-1} , o rendimento de etanol seria em torno de 3.590 L ha^{-1} .

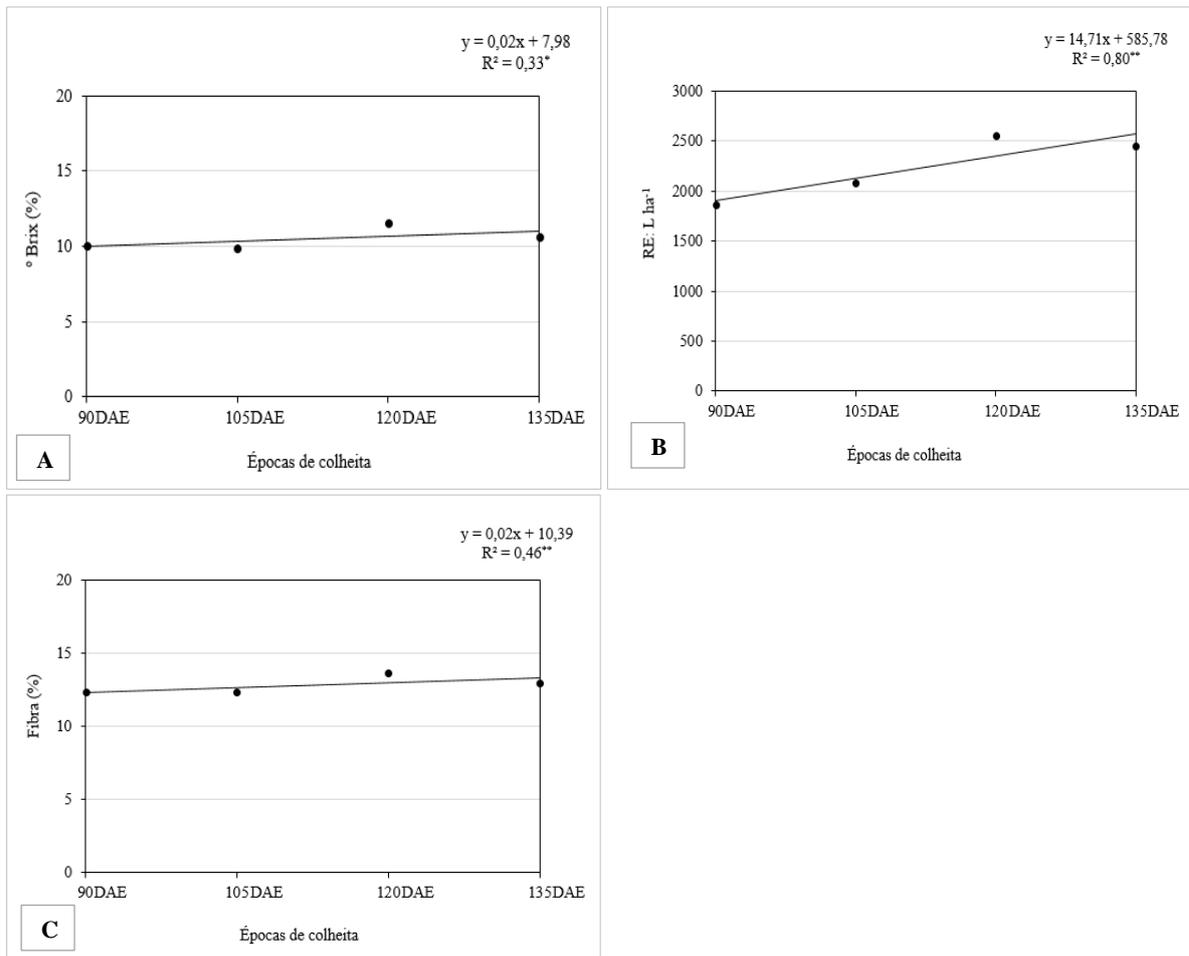


Figura 14. Gráfico da regressão ajustada ao °Brix (A), ao teor de fibra (B) e ao rendimento de etanol (C) em função das épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).

O desdobramento da interação entre as doses de NPK e as épocas de colheita das variáveis sacarose do caldo, representada pela Pol, açúcares totais recuperáveis (ATR), pureza (relação percentual entre Pol e °Brix) e açúcares redutores (AR) está apresentado na Tabela 18. As médias destas variáveis também foram comparadas por meio da análise de regressão polinomial, onde foram ajustadas equações lineares e quadráticas significativas a 1% e 5% probabilidade (Tabela 16).

Assim como o °Brix, os valores de Pol do caldo e ATR ficaram muito abaixo da faixa considerada adequada (de 8 a 13% para Pol; $> 80 \text{ kg t}^{-1}$ para ATR) para o processamento industrial (Pacheco, 2012; May et al., 2013). Em virtude da alta infestação da doença açucarada, que prejudicou o acúmulo de açúcares no colmo, não foi possível estabelecer, neste

experimento, o período de utilização industrial (PUI), definido por Shaffert; Parrella (2012) como o número de dias em que um genótipo apresenta ATR acima de 80 kg t⁻¹, permitindo melhor planejamento da colheita e gestão industrial da destilaria.

Tabela 18. Médias de Pol do caldo, ATR, AR e pureza do caldo de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliados em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).

Pol do caldo (%)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (Dose)
0DR	2,83 ^{±0,49} aB	3,00 ^{±0,47} aB	3,54 ^{±0,30} cAB	4,93 ^{±0,61} aA	3,58^{±0,29} b
0,5DR	4,01 ^{±0,34} aBC	3,06 ^{±0,29} aC	5,22 ^{±0,17} bAB	5,98 ^{±0,79} aA	4,49^{±0,31} ab
1,0DR	3,82 ^{±0,59} aB	4,39 ^{±0,63} aB	8,94 ^{±0,59} A	4,70 ^{±0,50} aB	5,46^{±0,54} a
1,5DR	3,56 ^{±0,56} aB	3,16 ^{±0,31} aB	5,60 ^{±0,45} A	4,59 ^{±0,16} aAB	4,23^{±0,29} b
Média (DAE)	3,56^{±0,25} B	3,40^{±0,24} B	5,82^{±0,49} A	5,00^{±0,27} A	
DMS ExD= 1,72		DMS DxE= 1,71		DMS D= 1,00	
DMS E= 0,86					
ATR (kg t ⁻¹)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (Dose)
0DR	43,10 ^{±2,78} aB	43,81 ^{±2,76} aB	46,77 ^{±1,69} cAB	54,78 ^{±4,02} aA	47,12^{±1,71} b
0,5DR	49,94 ^{±2,21} aBC	43,36 ^{±1,83} aC	56,50 ^{±1,10} bAB	61,18 ^{±5,00} aA	52,30^{±1,89} ab
1,0DR	48,10 ^{±2,96} aB	52,49 ^{±4,34} aB	76,61 ^{±3,70} aA	53,20 ^{±3,13} aB	57,60^{±3,04} a
1,5DR	46,44 ^{±3,25} aB	44,63 ^{±2,04} aB	59,41 ^{±3,09} bA	51,70 ^{±1,14} aAB	50,54^{±1,80} b
Média (DAE)	46,89^{±1,42} B	46,07^{±1,56} B	59,82^{±2,75} A	54,90^{±1,77} A	
DMS ExD= 10,44		DMS DxE= 10,72		DMS D= 5,56	
DMS E= 5,39					
AR (%)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (Dose)
0DR	2,67 ^{±0,16} aA	2,59 ^{±0,12} aA	2,51 ^{±0,08} aAB	2,12 ^{±0,09} aB	2,47^{±0,07} a
0,5DR	2,32 ^{±0,11} aAB	2,52 ^{±0,15} aA	2,10 ^{±0,04} abAB	1,9 ^{±0,10} aB	2,23^{±0,07} ab
1,0DR	2,29 ^{±0,26} aA	2,33 ^{±0,10} aA	1,01 ^{±0,22} cB	2,08 ^{±0,09} aA	1,93^{±0,15} b
1,5DR	2,38 ^{±0,15} aA	2,44 ^{±0,07} aA	2,05 ^{±0,07} bA	2,02 ^{±0,04} aA	2,22^{±0,06} ab
Média (DAE)	2,42^{±0,09} A	2,47^{±0,06} A	1,92^{±0,14} B	2,04^{±0,04} B	
DMS ExD= 0,48		DMS DxE= 0,45		DMS D= 0,32	
DMS E= 0,23					
Pureza (%)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (Dose)
0DR	28,27 ^{±0,46} aB	30,75 ^{±3,63} aB	32,97 ^{±2,46} cAB	44,42 ^{±2,75} aA	34,10^{±2,13} b
0,5DR	38,48 ^{±3,18} aA	32,73 ^{±4,34} aA	44,82 ^{±1,15} bcA	50,85 ^{±3,07} aA	41,24^{±2,08} ab
1,0DR	39,47 ^{±7,48} aB	38,15 ^{±2,91} aB	76,68 ^{±6,56} aA	45,42 ^{±2,72} aB	49,93^{±4,36} a
1,5DR	36,74 ^{±4,47} aA	34,88 ^{±2,04} aA	46,51 ^{±2,16} bA	47,30 ^{±1,28} aA	41,36^{±1,85} ab
Média (DAE)	35,74^{±2,58} B	34,13^{±1,66} B	50,24^{±4,07} A	46,80^{±1,27} A	
DMS ExD= 14,05		DMS DxE= 13,09		DMS D= 9,41	
DMS E= 6,59					

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna e maiúsculas na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância. Numeração sobrescrita indica o erro padrão da média. ATR: açúcares totais recuperáveis; AR: açúcares redutores; DR: dose recomendada; DAE: dias após emergência; DMS: diferença mínima significativa;

DxE: desdobramento da dose dentro de épocas de colheita; ExD: desdobramento da época de colheita dentro de doses; D: dose; E: época de colheita.

Nos tratamentos sem adubação e com 0,5DR (55-40-60 kg de NPK ha⁻¹), as melhores médias foram obtidas com a colheita em 135DAE, indicando que, sem ou com metade do aporte de NPK, houve tardiamente maior acúmulo de sacarose e açúcares totais recuperáveis no caldo de sorgo sacarino. Com a aplicação de 1,0DR (110-80-120 kg de NPK ha⁻¹) e da 1,5DR (165-120-180 kg de NPK ha⁻¹), o acúmulo máximo foi obtido em 120DAE, época considerada ótima

pela empresa detentora do híbrido Malibu 5010. A colheita aos 120DAE foi a única em que houve diferenças significativas entre as doses de NPK, com destaque para o tratamento em que houve aplicação de 1,0DR, para ambas variáveis tecnológicas (Tabela 18).

Neste trabalho, optou-se por apresentar os ajustes de equações polinomiais de regressão considerando o desdobramento de épocas de colheita dentro de cada dose, com intuito de identificar os efeitos da adubação sobre a antecipação ou ampliação da época de colheita. No que diz respeito à sacarose do caldo (Figura 15-A), os ajustes de equação de regressão foram significativos para todas as doses testadas, sendo o modelo quadrático o mais adequado para os valores obtidos em 1,0DR (110-80-120 kg de NPK ha⁻¹) e o modelo linear para as demais doses.

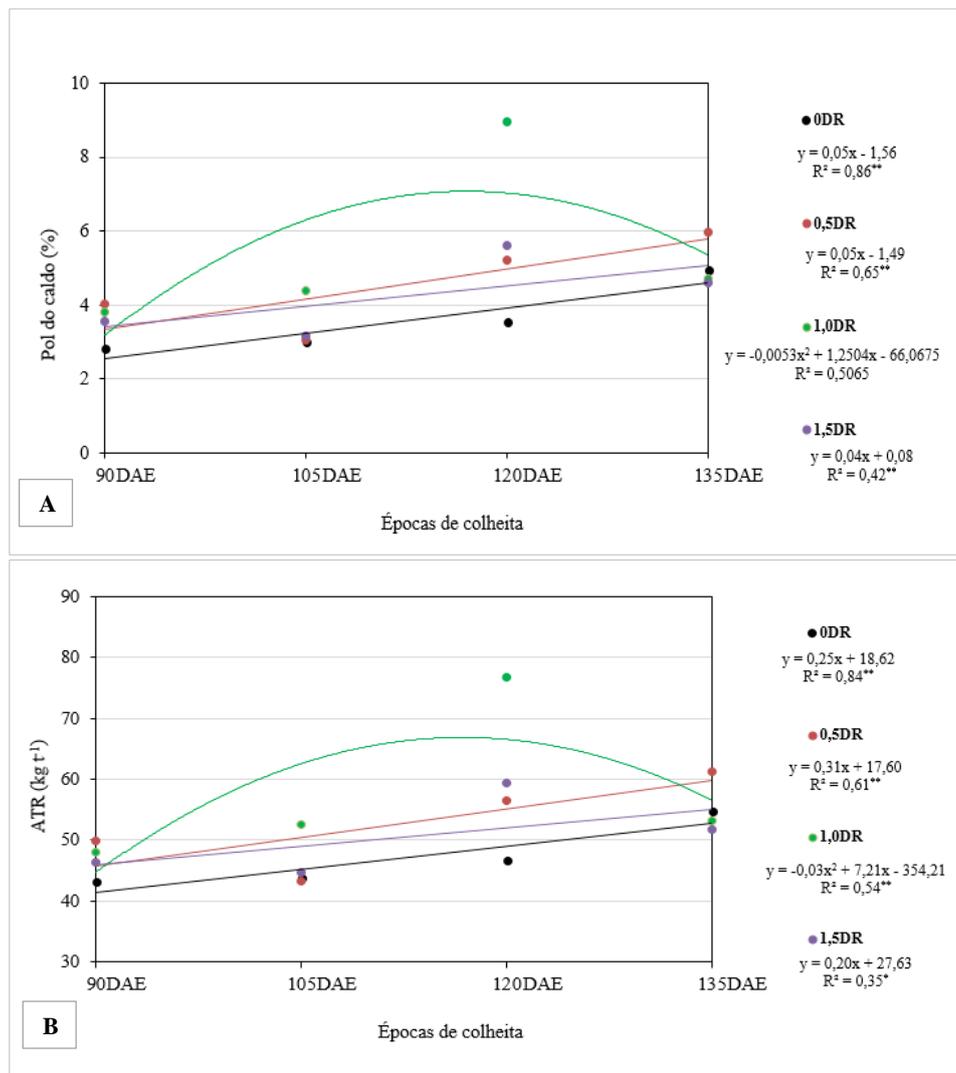


Figura 15. Desdobramento de médias de Pol do caldo (A) e de açúcares totais recuperáveis (ATR) (B) de sorgo sacarino cultivado em solo de fertilidade construída, através do ajuste de equações polinomiais de regressão, considerando as épocas de colheita (DAE) em cada nível de dose de NPK (DR) (Araras, SP, safra 2015/2016).

Em 0 DR; 0,5DR e 1,5DR, o máximo teor de Pol ocorreu aos 135DAE. Com a aplicação de 1,0DR, o maior teor de Pol no caldo aconteceu quando as plantas de sorgo sacarino foram colhidas em 118DAE. Quanto ao ATR (Figura 15-B), os modelos de regressão seguiram a mesma tendência de ajuste obtida para Pol do caldo.

Embora neste estudo o desempenho industrial do híbrido de sorgo sacarino tenha sido afetado pelo *Ergot*, muitos trabalhos apontaram a potencialidade da cultura para a produção de etanol. Martins et al. (2017) avaliaram o período de utilização industrial de cinco cultivares de sorgo sacarino, em Sete Lagoas-MG. As variedades BRS 511, BRS 508 e BRS 509 da Embrapa alcançaram médias de ATR de 90 a 100 kg t⁻¹, em quatro meses de cultivo. Para cana-de-açúcar, que leva de 12 a 18 meses para ser colhida, a média de ATR da safra 2017/2018, na região Centro-Sul, foi de 136,6 kg t (CONAB, 2018), demonstrando a viabilidade técnica e econômica do sorgo sacarino, inclusive para regiões onde o cultivo da cana-de-açúcar não é recomendado.

É importante salientar que, assim como o estudo de Martins e colaboradores, este trabalho utilizou a estimativa de ATR de acordo com o Consecana (2006), cujos cálculos foram elaborados para pagamento da cana-de-açúcar com base no teor de sacarose. Fernandes et al. (2014) avaliaram os açúcares redutores totais (ART) nas variedades BRS 506, BRS 508, BRS 509 e BRS 511 utilizando HPLC (High Performance Liquid Chromatography) e verificaram valores de 15,4%, 16,2%, 16,5% e 19,1%, respectivamente, superiores aos resultados estimados pelo método do Consecana, mostrando a necessidade de ajustes de parâmetros do método para aplicação em sorgo sacarino.

No que diz respeito aos açúcares redutores (AR%), representado pelos monossacarídeos glicose e frutose, os valores deste experimento situaram-se dentro da faixa considerada adequada (de 1 a 3%) para o processamento industrial (Pacheco, 2012) (Tabela 18). As médias dos tratamentos combinados mostraram um padrão de resposta diferente da Pol do caldo e ATR. Houve maior acúmulo de AR% em plantas colhidas em 90 e 105DAE, para 0DR, 0,5DR (55-40-60 kg de NPK ha⁻¹) e 1,0DR (110-80-120 kg de NPK ha⁻¹). No tratamento com 1,5DR (165-120-180 kg de NPK ha⁻¹), não foram notadas diferenças significativas entre as épocas de colheita. A análise do efeito das doses em cada época de colheita indicou que aos 120DAE houve diferenças significativas entre as doses de NPK, com maior teor de açúcares redutores em 0DR, mostrando que a fertilidade do solo foi suficiente para valores adequados desta característica (Tabela 18).

Segundo Masson et al. (2015) os açúcares redutores presentes no sorgo variam em função do genótipo e da fase de desenvolvimento da planta e são responsáveis por várias

reações metabólicas e fonte de energia. Channappagoudar et al. (2007) relataram que quando o sorgo se encontra na fase de maturação fisiológica há redução nos teores de açúcares redutores, corroborando os resultados deste experimento, em que as médias foram inferiores em 120 e 135DAE, com exceção do tratamento com aplicação de 1,5DR.

Os ajustes de equações de regressão para as médias de AR (%) foram significativos a 1% de probabilidade para todas as doses testadas. O modelo quadrático foi o mais adequado para os valores obtidos em 1,0DR (110-80-120 kg de NPK ha⁻¹), enquanto o linear foi mais adequado para as demais doses. Em 0DR; 0,5DR e 1,5DR, o máximo teor de AR% ocorreu aos 135DAE. Com a aplicação da 1,0DR, o maior teor de AR% no caldo aconteceu quando as plantas de sorgo sacarino foram colhidas em 123DAE (Figura 16-A).

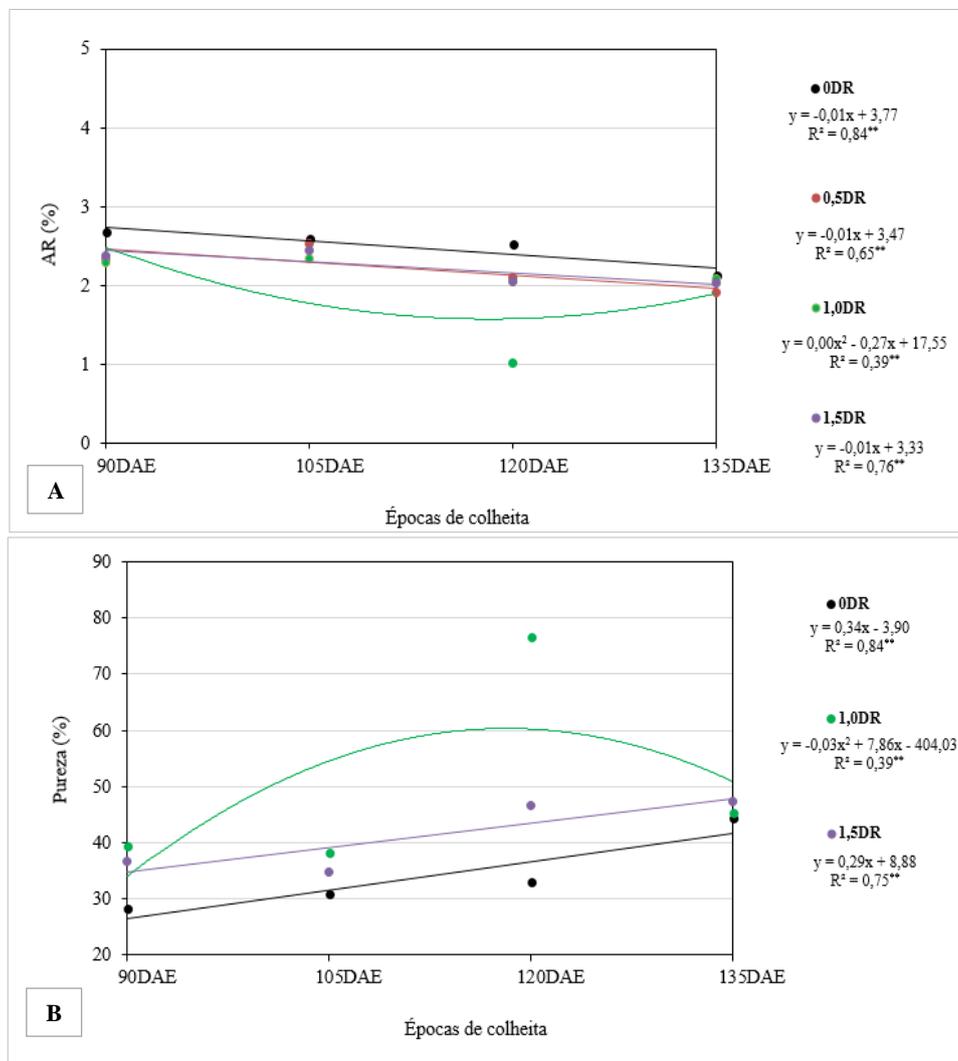


Figura 16. Desdobramento de médias de açúcares redutores-AR (%) (A) e de pureza do caldo (%) (B) de sorgo sacarino cultivado em solo de fertilidade construída, através do ajuste de equações polinomiais de regressão, considerando as épocas de colheita (DAE) em cada nível de dose de NPK (DR) (Araras, SP, safra 2015/2016).

Quanto à pureza do caldo (Tabela 18), variável tecnológica calculada pela relação entre o teor de sacarose (Pol) e o teor de sólidos solúveis (°Brix), as médias dos tratamentos combinados também ficaram abaixo do esperado (60-75%), cerca da metade do que é considerado adequado para processamento industrial (Pacheco, 2012). Nos tratamentos com 0,5DR (55-40-60 kg de NPK ha⁻¹) e 1,5DR (165-120-180 kg de NPK ha⁻¹) as médias da pureza do caldo não diferiram significativamente. Na ausência de adubação, a colheita foi postergada para 135DAE, época que apresentou média superior às demais. A aplicação de 1,0DR (110-80-120 kg de NPK ha⁻¹) proporcionou o melhor índice de pureza aos 120DAE, época considerada ótima para colheita do genótipo de sorgo sacarino testado. Assim como para a Pol, ATR e AR, a colheita em 120DAE foi a única em que detectaram-se diferenças significativas entre as doses de NPK, com destaque para o tratamento em que houve aplicação de 1,0DR, único tratamento que esteve dentro da faixa adequada para processamento industrial (Tabela 18).

Os ajustes de equações de regressão para as médias de pureza do caldo foram significativos a 1% de probabilidade para todas as doses testadas, com exceção de 0,5DR. O modelo quadrático foi o mais adequado para os valores obtidos em 1,0DR (110-80-120 kg de NPK ha⁻¹), enquanto o linear foi mais adequado para as demais doses. Em 0DR e 1,5DR, os índices de pureza foram maiores aos 135DAE. Com a aplicação de 1,0DR, a pureza do caldo foi superior quando as plantas de sorgo sacarino foram colhidas em 118DAE (Figura 16-B). Cabe ressaltar que, em sorgo sacarino, devido ao menor teor de sacarose em detrimento de altos teores de açúcares redutores, há a tendência da pureza do caldo apresentar baixos índices, quando comparada à cana-de-açúcar (BOLONHEZI et al., 2015).

Considerando que os aspectos mais importantes para a avaliação da qualidade da matéria-prima para produção de etanol seja a riqueza de açúcares (Pol e AR) presentes nos colmos e o potencial de recuperação destes açúcares (ATR) (GOMES, 2014), e o fato de que todo o experimento tenha sido comprometido pelo *Ergot*, torna-se difícil apontar qual teria sido o tratamento que resultou em desempenho superior para estes indicadores. Contudo, os resultados evidenciaram que a adubação foi importante nos aspectos inerentes à maturação e qualidade industrial, apesar de não ter influenciado as características de crescimento a ponto de promover alterações no ponto ótimo de colheita do sorgo sacarino.

Pesquisadores como Crusciol (2017) têm defendido a aplicação de nutrientes e maturadores na época de pré-maturação da cana-de-açúcar. O autor destaca que, assim como se realiza o manejo nutricional visando produtividade de cana-de-açúcar, é necessário outro manejo nutricional para dar qualidade a matéria-prima, pois o processo de fabricação,

transporte, acúmulo e armazenamento de açúcar na planta envolve a participação de nutrientes chave, sobretudo N, P, K, Mg Zn e B. Todos estes elementos participam direta ou indiretamente na fotossíntese, ativação enzimática e transporte de carboidratos e, portanto, são os responsáveis pela produção de sacarose e açúcares redutores. Por isso, o conhecimento da demanda de nutrientes de culturas sacaríneas é fundamental para uma reposição adequada, sobretudo em solos de fertilidade construída, para que não haja falta e nem excessos de nutrientes. O exame minucioso das principais variáveis tecnológicas sinalizou que a aplicação da 1,0DR foi a melhor para a qualidade do caldo do sorgo sacarino.

4.3. Acúmulo e estocagem de nutrientes

A interação entre as doses de NPK e as épocas de colheita teve efeitos significativos sobre o conteúdo de N e de P no sorgo sacarino, aceitando-se a hipótese de que a absorção destes elementos varia na planta dependendo da adubação e da época de colheita. Para o acúmulo de K, não foram constatados efeitos de interação, com médias estatisticamente diferentes para o fator época de colheita, apesar de os resultados terem apresentado alta variabilidade (CV% 40-47%). Os modelos polinomiais de regressão também seguiram este padrão (Tabela 19).

Tabela 19. Análise de variância (ANOVA) e análise de regressão dos teores e acúmulo de macronutrientes primários de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliados em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).

ANOVA: p-valor do teste F							
FV	gl	N	¹ P	K	N ac.	¹ P ac.	¹ K ac.
Bloco	4	0,40 ^{ns}	0,42 ^{ns}	0,62 ^{ns}	0,81 ^{ns}	0,60 ^{ns}	0,34 ^{ns}
Dose (D)	3	0,18 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,72 ^{ns}	0,86 ^{ns}	0,37 ^{ns}	0,27 ^{ns}
Época colheita (E)	3	<0,01 ^{**}	<0,01 ^{**}	0,04 [*]	<0,01 ^{**}	<0,01 ^{**}	<0,01 ^{**}
D x E	9	0,02 [*]	<0,01 ^{**}	0,13 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,58 ^{ns}
ANOVA da regressão							
Dose (D)	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Época colheita (E)	1	Q ^{**}	L ^{**}	ns	Q ^{**}	Q ^{**}	Q ^{**}
D x E	1	Q ^{**}	L ^{**}	ns	ns	ns	ns
CV% (D)		12,23%	4,67%	47,16%	22,39%	19,56%	20,54%
CV% (E)		12,05%	2,84%	40,71%	22,75%	11,72%	23,30%
Teste de Norm. (teste S-W)		0,19	0,22	0,37	0,81	0,64	0,36

FV: fonte de variação; gl: grau de liberdade; ac.: acumulado ns: não significativo; *significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ** significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; Norm.: normalidade; teste S-W: teste de Shapiro-Wilk. ¹Para atender pressuposição de normalidade (p-valor $\geq 0,05$) os dados foram transformados conforme metodologia de Box & Cox (1964);

Para as variáveis de acúmulo de NPK, que relaciona o conteúdo de nutrientes na biomassa total da cultura, a interação entre as doses e as épocas de colheita não foram significativas. Apresentaram diferenças significativas as médias do fator época de colheita, com coeficiente de variação situando-se entre 11 e 23%, o que indica boa precisão experimental para condições de campo. As médias destas variáveis também foram comparadas por meio da análise de regressão polinomial, onde foram ajustadas equações lineares e quadráticas significativas a 1% e 5% probabilidade (Tabela 19).

O desdobramento da interação entre as doses de NPK e as épocas de colheita do conteúdo de N e de P do tecido vegetal de sorgo sacarino consta na Tabela 20.

Tabela 20. Teores de macronutrientes primários em plantas de sorgo sacarino cultivadas com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliados em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).

N (g kg ⁻¹)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (dose)
0DR	13,90 ^{±0,70} aA	13,60 ^{±0,58} aA	15,90 ^{±0,57} aA	10,90 ^{±1,13} aB	13,58^{±0,54} a
0,5DR	13,10 ^{±0,31} aA	12,00 ^{±0,50} aA	13,80 ^{±0,93} abA	12,80 ^{±0,51} aA	12,93^{±0,32} a
1,0DR	12,80 ^{±0,77} aA	12,90 ^{±0,89} aA	13,40 ^{±0,75} abA	11,30 ^{±0,51} aA	12,60^{±0,38} a
1,5DR	14,20 ^{±0,72} aA	12,30 ^{±0,80} aA	11,60 ^{±0,53} bA	11,90 ^{±0,43} aA	12,50^{±0,37} a
Média (DAE)	13,50^{±0,33} A	12,70^{±0,35} AB	13,68^{±0,48} A	11,73^{±0,36} B	
	DMS ExD=2,61	DMS Dx E=2,62	DMS D= 1,48	DMS E=1,31	
P (g kg ⁻¹)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (dose)
0DR	1,47 (1,07) ^{±0,20} aA	1,09 (1,01) ^{±0,10} aBC	1,21 (1,03) ^{±0,10} aAB	0,89 (0,98) ^{±0,07} aC	1,17 (1,02)^{±0,08} a
0,5DR	1,51 (1,07) ^{±0,19} aA	1,32 (1,05) ^{±0,06} aA	0,99 (1,00) ^{±0,07} aB	0,72 (0,94) ^{±0,06} aC	1,14 (1,01)^{±0,09} a
1,0DR	1,03 (1,00) ^{±0,09} bA	0,97 (1,00) ^{±0,03} aA	0,94 (1,00) ^{±0,05} aA	0,82 (0,96) ^{±0,07} aA	0,94 (0,99)^{±0,04} a
1,5DR	0,82 (0,96) ^{±0,06} bA	1,05 (1,01) ^{±0,07} aA	0,89 (0,98) ^{±0,07} aA	0,85 (0,97) ^{±0,04} aA	0,90 (0,98)^{±0,04} a
Média (DAE)	1,21 (1,03)^{±0,10}	1,11 (1,02)^{±0,04}	1,01 (1,00)^{±0,05}	0,82(0,96)^{±0,03}	
	DMS ExD= (0,06)	DMS Dx E= (0,05)	DMS D= (0,04)	DMS E= (0,02)	
K (g kg ⁻¹)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (dose)
0DR	10,53 ^{±2,15}	9,23 ^{±1,07}	12,95 ^{±2,18}	7,18 ^{±1,10}	9,97^{±0,92} a
0,5DR	11,15 ^{±1,97}	11,28 ^{±1,91}	17,27 ^{±3,33}	7,77 ^{±0,97}	11,87^{±1,28} a
1,0DR	8,32 ^{±0,73}	8,68 ^{±0,48}	14,58 ^{±3,82}	11,72 ^{±2,53}	10,82^{±1,22} a
1,5DR	10,69 ^{±1,52}	11,87 ^{±2,62}	9,13 ^{±0,57}	11,95 ^{±1,82}	10,91^{±0,86} a
Média (DAE)	10,17^{±0,81} AB	10,27^{±0,85} AB	13,48^{±1,44} A	9,65^{±0,94} B	
	DMS ExD=7,74	DMS Dx E=7,47	DMS D= 4,83	DMS E=3,73	

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna e maiúsculas na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância. Numeração sobrescrita indica o erro padrão da média. Valores entre parênteses refletem a média transformada, conforme metodologia de Box e Cox (1964).

DAE: dias após emergência; DMS: diferença mínima significativa; Dx E: desdobramento da dose dentro de épocas de colheita; ExD: desdobramento da época de colheita dentro de doses; D: dose; D: dose; E: época de colheita.

Rao (2013), ao testar a influência da adubação nitrogenada e potássica sobre o ponto ótimo de colheita do sorgo sacarino, também avaliou o consumo de nutrientes. Assim como neste estudo, o autor não encontrou efeitos significativos de interação entre os estádios de colheita e as práticas de manejo de nutrientes para o conteúdo NPK. Contudo, nos efeitos isolados da adubação e estágio de colheita, as variáveis responderam de forma significativa, com maiores acúmulos de NPK no estágio de maturação fisiológica, fase em que ocorreu maior taxa de assimilação de CO₂, resultando em maior acúmulo de matéria seca, com reflexos positivos sobre o desenvolvimento radicular e conseqüentemente aumentando a capacidade de absorção de nutrientes.

Para o conteúdo de N, não houve diferença significativa entre as doses, em cada época de colheita. Contudo, no tratamento com 0DR, plantas colhidas em 135DAE apresentaram menor teor de N em seus tecidos. Quanto ao conteúdo de P, as doses de NPK provocaram diferenças em plantas de sorgo sacarino colhidas aos 90DAE, com resultados inferiores para a aplicação de 1,0DR (110-80-120 kg de NPK ha⁻¹) e de 1,5DR (165-120-180 kg de NPK ha⁻¹), devido a uma possível indisponibilidade momentânea de P no solo, tendo em vista que nas demais épocas de colheita não foi verificada diferenças entre as doses. Esperava-se que, em doses maiores, ocorresse maior disponibilidade de P na solução do solo, em razão da capacidade elevada de adsorção deste elemento em solos de textura argilosa, conforme explicaram Novais e Smyth (1999).

Os ajustes de equações de regressão quadrática para as médias de conteúdo de N foram significativos a 1% de probabilidade somente para 0DR (R²=61%) e 1,5DR (R²=99%). Nos tratamentos com 0DR e 1,5DR, as épocas em que ocorreram os máximos conteúdos de N foram aos 109DAE e 125DAE, respectivamente (Figura 17-A). Quanto ao P, foram ajustadas equações lineares para os níveis de adubação 0 DR (R²=99%) e 0,5 DR (R²=74%), indicando que parte expressiva da variabilidade do conteúdo de P foi explicada por diferentes épocas de colheita, notando-se um decréscimo ao longo do tempo (Figura 17-B). Plantas de sorgo sacarino colhidas aos 120DAE foram as que apresentaram maior conteúdo de K (Tabela 20). Os resultados ajustaram-se ao modelo de regressão quadrático (Figura 18), com máximo conteúdo de K obtido em 116DAE, apesar de o modelo ter apresentado R²=54% para explicar a variabilidade em função das épocas de colheita.

Muitos estudos reportaram que o K é o elemento mais exigido pelo sorgo sacarino (ROSOLEM; MALAVOLTA, 1981; PIVETTA, 2014; SOARES et al., 2014). Neste experimento, o teor de N foi cerca de 17% maior que de K, contrariando esta expectativa, mas

possível em virtude das características genéticas do cultivar e condições edafoclimáticas que interferem no desenvolvimento radicular e na absorção dos nutrientes (SOARES et al., 2014).

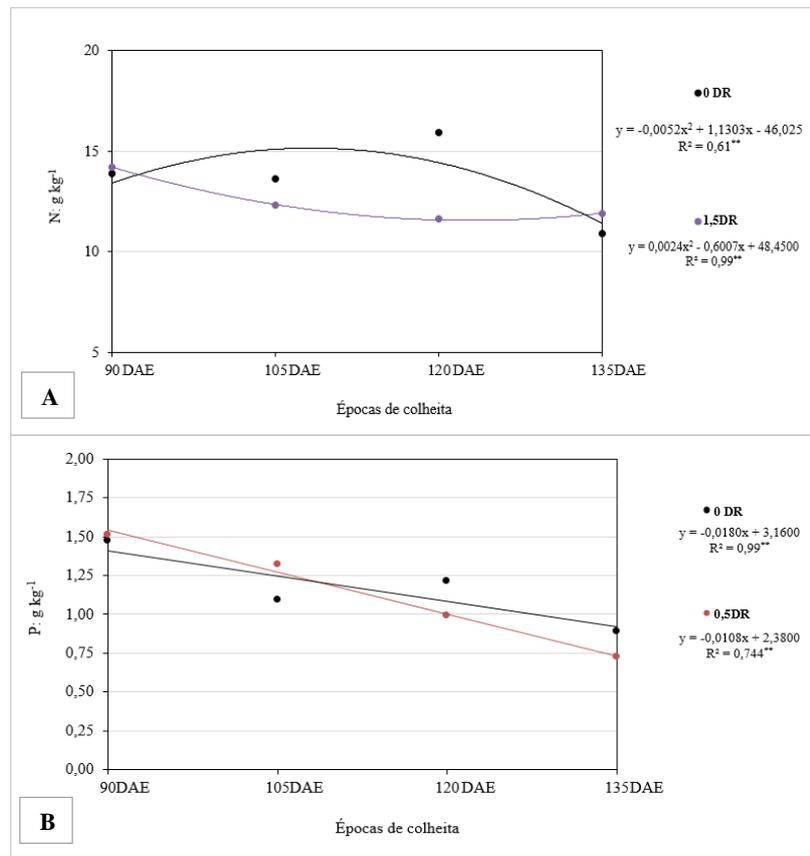


Figura 17. Desdobramento de médias da concentração de N (A) e P (B) de sorgo sacarino cultivado em solo de fertilidade construída, através do ajuste de equações polinomiais de regressão, considerando as épocas de colheita (DAE) em cada nível de NPK (DR) (Araras, SP, safra 2015/2016).

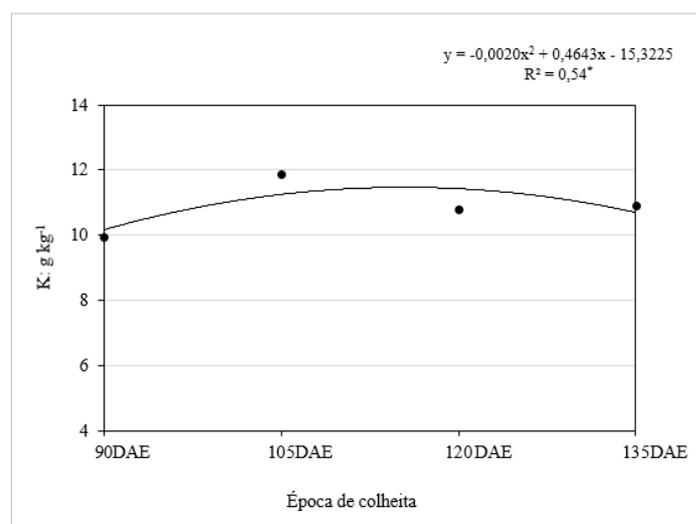


Figura 18. Gráfico da regressão ajustada do teor de K em função de diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).

Em média, neste estudo, os teores de N, P e K foram de 12,90; 1,04 e 10,89 g kg⁻¹, muito abaixo das faixas consideradas adequadas pela literatura científica (ROSOLEM; MALAVOLTA, 1982; CANTARELLA et al., 1997; MARTINEZ; CARVALHO; SOUZA, 1999; OLIVEIRA, 2004), embora não se tenha diagnosticado nenhuma deficiência visual nutricional nas plantas durante todo o ciclo do sorgo sacarino (Figuras do Anexo I). Cavalcante (2017), cultivando o híbrido Malibu 5010 em um Latossolo Vermelho (textura média; 40,6 g dm⁻³ de M.O.; 8,6 mg dm⁻³ de P; e 1,3 mmol_cdm⁻³ de K) e adubando com 118-134-157 kg de NPK ha⁻¹, obteve produtividade máxima de matéria seca de 43,8 t ha⁻¹ e de 93,1 t ha⁻¹ de matéria fresca, com conteúdo de nutrientes também abaixo do recomendado (9,39; 1,67; 12,22 g kg⁻¹ de N, P e K, respectivamente).

Os resultados deste estudo e de Cavalcante (2017) demonstraram a necessidade de revisão dos níveis críticos foliares e de solo para o sorgo sacarino, sobretudo pela entrada no mercado de cultivares modernos e de alto potencial produtivo, além de novas configurações de sistemas de produção que anteriormente não existiam.

Os valores médios de acúmulo de NPK por tratamento combinado apresentaram diferenças significativas em função das épocas de colheita. A extração de N situou-se entre 213 e 398 kg ha⁻¹, para uma produção matéria seca entre 15 e 31 t ha⁻¹ (Tabela 21).

Han et al. (2011) investigaram o acúmulo de NPK de cultivares de sorgo sacarino de maturação precoce, média e tardia em duas safras no norte da China, encontrando valores de absorção de N variando entre 105 e 339 kg ha⁻¹. A época de colheita que proporcionou maior acúmulo de N foi aos 105DAE (Tabela 21). Os resultados ajustaram-se ao modelo de regressão quadrático (Figura 19-A), com alto percentual de poder explicativo da variabilidade em função das épocas de colheita (R²=75%), sendo o máximo acúmulo de N obtido aos 113DAE. No trabalho de Cavalcante (2017), o acúmulo de N do sorgo sacarino Malibu 5010 estabilizou-se a partir da fase de emborrachamento (57DAE) e assim se mantendo até a colheita (93DAE).

Quanto ao acúmulo de P, os valores médios dos tratamentos combinados situaram-se entre 15 e 40 kg ha⁻¹, para uma produção matéria seca entre 15 a 31 t ha⁻¹ (Tabela 21). Han et al. (2011) obtiveram valores de absorção de P variando entre 15 e 75 kg ha⁻¹. Plantas colhidas em 105DAE apresentaram maior média de acúmulo de P (Tabela 21). O modelo de regressão quadrático (Figura 19-B) foi ajustado explicando 84% da variação do acúmulo de P em função das épocas de colheita, sendo a extração máxima obtida em 109DAE.

Tabela 21. Acúmulo de macronutrientes primários em plantas de sorgo sacarino cultivadas com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliado em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).

N acumulado (kg ha ⁻¹)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (dose)
0DR	213,27 ^{±34,67}	372,97 ^{±39,81}	316,54 ^{±35,07}	360,71 ^{±29,50}	315,88^{±21,57} a
0,5DR	256,37 ^{±21,58}	366,87 ^{±26,74}	336,67 ^{±22,90}	331,93 ^{±51,81}	322,96^{±17,84} a
1,0DR	324,44 ^{±22,56}	390,00 ^{±41,39}	351,72 ^{±10,05}	251,52 ^{±24,61}	329,42^{±17,00} a
1,5DR	218,16 ^{±33,14}	398,37 ^{±33,70}	327,46 ^{±40,13}	301,25 ^{±11,79}	311,31^{±20,70} a
Média (DAE)	253,06^{±58,47} C	382,05^{±83,67} A	333,10^{±134,22} AB	311,35^{±62,57} BC	
	DMS Dx E= 121,23	DMS Ex D= 122,51	DMS D= 67,27	DMS E= 61,26	
P acumulado (kg ha ⁻¹)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (dose)
0DR	22,92 (4,75) ^{±4,36}	32,50 (5,63) ^{±6,55}	29,41 (5,45) ^{±2,81}	22,42 (4,77) ^{±2,07}	26,81 (5,15)^{±2,21} a
0,5DR	28,35 (5,32) ^{±4,10}	40,47 (6,38) ^{±3,30}	26,33 (5,15) ^{±3,14}	19,24 (4,39) ^{±3,28}	28,60 (5,31)^{±2,37} a
1,0DR	20,91 (4,61) ^{±2,00}	27,42 (5,27) ^{±1,94}	24,96 (5,04) ^{±1,52}	18,02 (4,26) ^{±2,71}	22,83 (4,79)^{±1,27} a
1,5DR	15,88 (4,04) ^{±0,94}	32,88 (5,74) ^{±3,55}	26,17 (5,10) ^{±4,68}	21,57 (4,69) ^{±0,97}	24,13 (4,89)^{±1,99} a
Média (DAE)	22,02 (4,68)^{±7,99} C	33,32 (5,76)^{±9,83} A	26,72 (5,18)^{±6,86} B	20,31 (4,53)^{±5,27} C	
	DMS Dx E= (0,99)	DMS Ex D= (1,20)	DMS D= (0,93)	DMS E= (0,50)	
K acumulado (kg ha ⁻¹)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (dose)
0DR	163,93 (12,36) ^{±48,13}	263,60 (16,04) ^{±40,03}	323,05 (17,64) ^{±67,60}	185,51 (13,40) ^{±35,68}	234,02 (14,86)^{±26,93} a
0,5DR	205,02 (14,17) ^{±30,34}	333,64 (18,10) ^{±44,82}	464,64 (20,94) ^{±110,56}	201,67 (14,09) ^{±26,38}	301,24 (16,83)^{±38,10} a
1,0DR	169,27 (12,97) ^{±17,11}	242,24 (15,55) ^{±14,57}	386,82 (18,99) ^{±105,60}	263,60 (15,73) ^{±75,43}	265,48 (15,81)^{±35,15} a
1,5DR	207,06 (14,23) ^{±30,62}	378,91 (18,75) ^{±98,73}	269,18 (16,22) ^{±42,43}	302,27 (17,20) ^{±47,39}	289,36 (16,60)^{±31,27} a
Média (DAE)	186,32 (13,43)^{±71,53} C	304,60 (17,11)^{±132,01} AB	360,92 (18,45)^{±192,12} A	238,26 (15,10)^{±112,96} BC	
	DMS Dx E= (6,29)	DMS Ex D= (6,07)	DMS D= (3,09)	DMS E= (3,14)	

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna e maiúsculas na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância. Numeração sobrescrita indica o erro padrão da média. Valores entre parênteses refletem a média transformada, conforme metodologia de Box e Cox (1964).

DAE: dias após emergência; DMS: diferença mínima significativa; Dx E: desdobramento da dose dentro de épocas de colheita; Ex D: desdobramento da época de colheita dentro de doses; D: dose.

O acúmulo de P pelo híbrido Malibu 5010, observado por Cavalcante (2017), aumentou progressivamente até a ocasião do corte (93 DAE). O autor constatou que a partir do estágio de emborrachamento (57DAE), parte do P absorvido foi redistribuída das folhas para as panículas, para ser reservado nos grãos. Soares et al. (2014) relataram que a maior parte da quantidade de P é concentrada nos grãos, que chega a acumular 42 a 53% do total de P absorvido pela planta.

As médias de extração de K dos tratamentos combinados situaram-se entre 163 e 464 kg ha⁻¹, para uma produção matéria seca entre 15 a 31 t ha⁻¹ (Tabela 21). No estudo de Han et al. (2011), os valores de absorção de K estiveram entre 109 e 300 kg ha⁻¹. Aos 120DAE, as

plantas de sorgo sacarino apresentaram maior média de acúmulo de K em relação as demais épocas de colheita (Tabela 21).

Ajustou-se o modelo de regressão quadrático (Figura 19-C), que explicou 96% da variação da extração de K em função das épocas de colheita, com máximo acúmulo obtido aos 114DAE. Cavalcante (2017) observou que a extração de K pelo sorgo sacarino Malibu 5010 estabilizou-se a partir da fase V9 (43DAE) e mantendo-se até a colheita (93DAE).

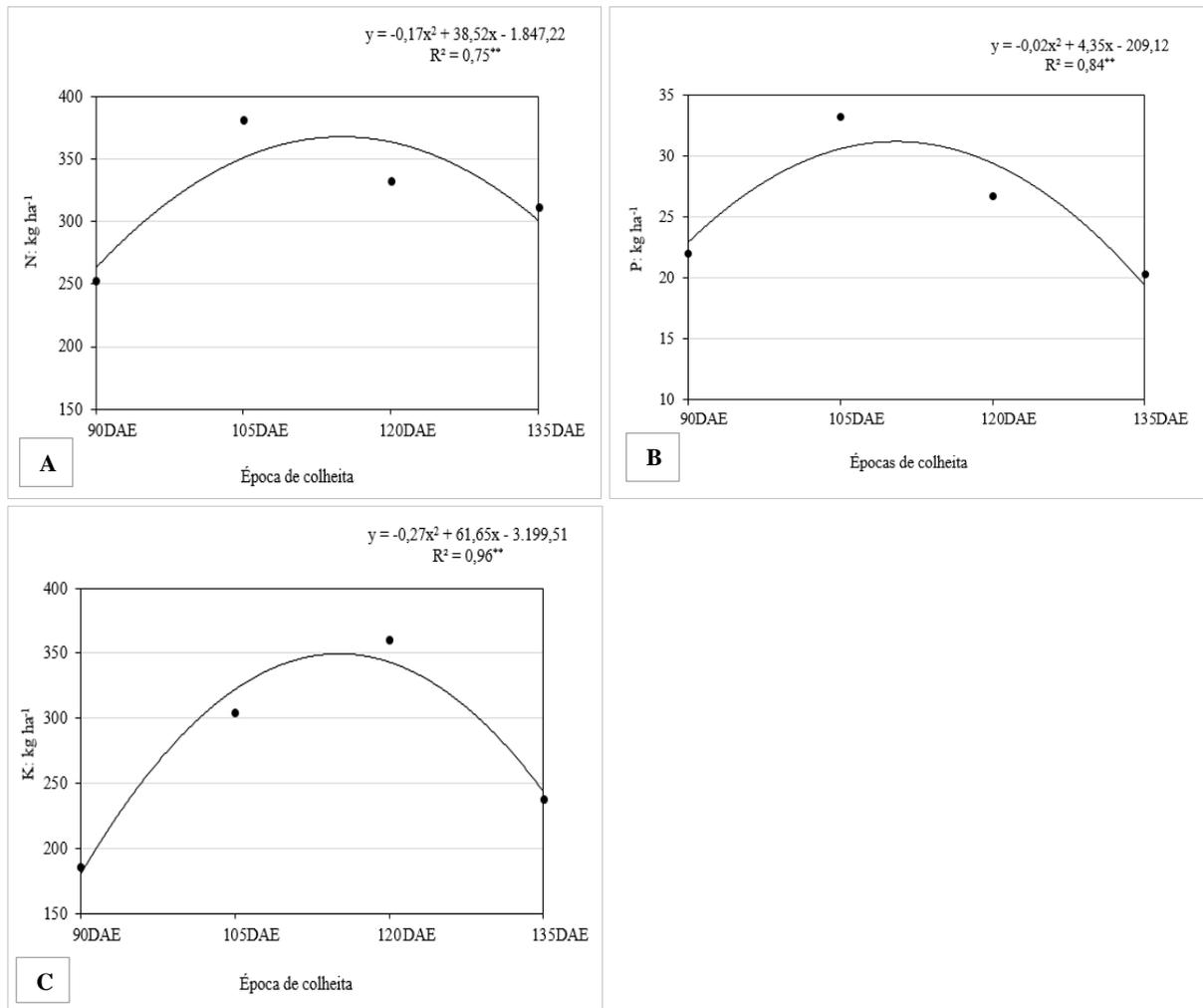


Figura 19. Gráficos da regressão ajustada aos teores N (A), P (B) e K (C) no tecido vegetal em função de diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).

Ao final das avaliações, a fertilidade do solo após o cultivo do sorgo sacarino revelou que, com exceção do P, os atributos químicos não diferiram quanto a forma de manejo da adubação (Tabela 22).

Tabela 22. Características químicas do solo após o cultivo do sorgo sacarino com doses crescentes de NPK (Araras, SP, safra 2015/2016).

Atributos	Unidade	0DR	0,5DR	DR	1,5DR	DMS	CV%
P _{resina}	mg dm ⁻³	13,90 ^{±0,70} A	13,60 ^{±0,58} A	15,90 ^{±0,57} A	10,90 ^{±1,13} B	5,71	29,39%
M.O.	g dm ⁻³	31,95 ^{±2,00} A	32,25 ^{±1,57} A	32,40 ^{±2,22} A	32,45 ^{±2,06} A	3,70	13,72%
pH (CaCl ₂)	-	5,68 ^{±0,08} A	5,63 ^{±0,07} A	5,53 ^{±0,06} A	5,43 ^{±0,08} A	0,28	5,91%
K		1,89 ^{±0,15} A	1,96 ^{±0,12} A	2,10 ^{±0,18} A	2,01 ^{±0,15} A	0,55	32,87%
Ca		28,70 ^{±1,06} A	28,20 ^{±1,12} A	28,10 ^{±1,10} A	27,55 ^{±0,99} A	3,70	15,72%
Mg		16,05 ^{±1,06} A	15,85 ^{±1,09} A	15,15 ^{±0,96} A	14,10 ^{±0,89} A	3,47	27,09%
H+Al	mmol _c dm ⁻³	27,40 ^{±1,31} A	29,00 ^{±1,21} A	29,55 ^{±1,15} A	31,55 ^{±1,33} A	4,46	18,14%
Al		0,27 ^{±0,02} A	0,28 ^{±0,02} A	0,23 ^{±0,01} A	0,28 ^{±0,03} A	0,08	37,55%
SB		46,75 ^{±2,01} A	46,00 ^{±2,18} A	45,36 ^{±1,97} A	43,53 ^{±1,83} A	6,88	18,11%
CTC		74,15 ^{±1,80} A	75,00 ^{±1,68} A	74,91 ^{±1,70} A	75,08 ^{±1,69} A	5,30	8,46%
V	%	62,79 ^{±1,76} A	60,87 ^{±1,89} A	60,21 ^{±1,70} A	57,76 ^{±1,74} A	6,41	12,68%

Médias seguidas de letras iguais na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Numeração sobrescrita indica o erro padrão da média.

P: fósforo; M.O.: matéria orgânica; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; H+Al: acidez potencial; Al: alumínio; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica; V%: saturação por bases DR: dose recomendada; DMS: diferença mínima significativa; CV%: coeficiente de variação.

Esperava-se que os teores de K do solo apresentassem valores distintos entre os tratamentos em função do aumento crescente da quantidade aplicada e da extração do nutriente ter sido estatisticamente igual entre as doses aplicadas. Por conseguinte, as características químicas do solo como a SB, CTC e V% também teriam seus teores alterados pelo maior estoque de K no solo. Nas parcelas tratadas com 1,5DR de P (120 kg ha⁻¹) acreditava-se que na dosagem mais alta houvesse maior disponibilidade P na solução do solo. Comparando o balanço do P com o resultado da análise do solo (Tabela 23), tem-se o indicativo que houve perda deste elemento no sistema, muito provavelmente devido ao processo de fixação de P em solos com maiores teores de óxidos de ferro e alumínio.

Tabela 23. Balanço de macronutrientes primários em solo de fertilidade construída após o cultivo de sorgo sacarino com doses crescentes de NPK (Araras, SP, safra 2015/2016).

Tratamentos	¹ N (kg ha ⁻¹)			² P (kg ha ⁻¹)			² K (kg ha ⁻¹)				
	E	S	Balanço	E	S	Balanço	³ Solo	E	S	Balanço	³ Solo
0DR	104	316	-212	75	26,81	48	28	282	234	48	148
0,5DR	159	323	-164	92	28,6	64	27	332	301	31	153
1,0DR	214	329	-115	110	22,83	87	32	382	265	116	164
1,5DR	269	311	-42	127	24,13	103	22	432	289	142	157

¹ N estimado pela análise inicial do solo (Tabela 4), através da relação 1 dag kg⁻¹ de M.O = 30 kg de N ha⁻¹ (Sousa; Lobato, 2004). ² Valores não estão expressos em P₂O₅ e K₂O. ³ Teores finais do elemento no solo, após o cultivo do sorgo sacarino; E: entrada de nutrientes; S: saída de nutrientes.

Ainda que, para as condições do Estado de São Paulo, não exista um critério confiável para recomendação da adubação nitrogenada baseada na análise de solo (RAIJ, 2011), considerando a estimativa teórica de N a partir da matéria orgânica orientada por Sousa; Lobato (2004), haveria depleção no estoque deste nutriente após o cultivo do sorgo sacarino (Tabela 23). Resende et al. (2016) explicaram que as culturas desenvolvidas em solo de fertilidade construída não estão livres de desequilíbrios nutricionais, sendo o manejo adequado da fertilidade do solo um dos principais desafios em sistemas de produção mais intensivos. Culturas de altas produtividades e extração de nutrientes impõem variações no consumo das reservas de nutrientes do solo, acarretando em déficits ou sobras. Neste aspecto, acompanhar o balanço de nutrientes é fundamental para a manutenção do solo de fertilidade construída.

O estoque de K após o cultivo do sorgo sacarino foi bem superior ao provisionado pelo balanço de entradas e saídas. O aporte de K no solo, desconsiderando as fontes minerais empregadas, pode estar associado à mineralização da matéria orgânica da comunidade vegetal infestante, composta principalmente de gramíneas, que acumulam grande quantidade deste elemento. Estudos mostraram que a liberação de K dos restos vegetais ocorre de forma relativamente rápida em função das condições ambientais e independente da espécie de planta de cobertura, devido ao fato do K estar presente na forma iônica nas plantas e não estar ligado a estruturas orgânicas (CALONEGO; FOLONI; ROSOLEM, 2005; TORRES; PEREIRA, 2008). Torres; Pereira (2008) avaliaram a disponibilização do K em LATOSSOLO Vermelho Amarelo de textura média a partir de plantas de cobertura em uma área em pousio com predomínio de gramíneas. Os autores verificaram que as plantas da área do pousio acumularam $75,80 \text{ kg ha}^{-1}$, sendo que após 98 dias da dessecação 87,81% do K acumulado tinha sido liberado ao solo. Lupwayi et al. (2005) verificaram que um período de 52 dias pode ser satisfatório para que cerca de 90 % do K contido no resíduo vegetal seja liberado, além do fato da matéria orgânica incrementar a CTC do solo, diminuindo a probabilidade de perda do K por lixiviação.

4.4. Eficiência nutricional do sorgo sacarino em solo de fertilidade construída

A análise de variância mostrou ausência de interação significativa entre as doses de NPK e as épocas de colheita, para todos os indicadores de eficiência nutricional (Tabela 24), considerando a hipótese de que adubações excessivas prejudicariam o crescimento do sorgo sacarino e influenciariam diretamente a eficiência de uso de nutrientes. Doses crescentes de NPK diferiram significativamente nos indicadores de Eficiência de Uso (EU), de Absorção (EAb) e de Utilização (EUt). A ausência de respostas significativas para a Eficiência Agronômica (EA), Fisiológica (EF) e de Produção (EP) está associada à alta variabilidade dos resultados, como pode ser observado pelos altos coeficientes de variação (39-81%), em função da presença de médias negativas de algumas parcelas (Tabela 24).

Tabela 24. Análise de variância (ANOVA) e análise de regressão da eficiência nutricional de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliada em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).

ANOVA: p-valor do teste F							
FV	gl	¹ EA	¹ EP	¹ EF	EU	EAb	² EUt
Bloco	4	0,09 ^{ns}	0,38 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,82 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,69 ^{ns}
Dose (D)	2	0,53 ^{ns}	0,69 ^{ns}	0,24 ^{ns}	<0,01 ^{**}	<0,01 ^{**}	<0,01 ^{**}
Época colheita (E)	3	0,15 ^{ns}	0,70 ^{ns}	0,71 ^{ns}	0,18 ^{ns}	<0,01 ^{**}	0,19 ^{ns}
D x E	6	0,99 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,38 ^{ns}	0,87 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,28 ^{ns}
ANOVA da regressão							
Dose (D)	1	ns	ns	ns	Q ^{**}	Q ^{**}	Q ^{**}
Época colheita (E)	1	ns	ns	ns	Q ^{**}	Q ^{**}	Q ^{**}
D x E	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV% (D)		52,90%	39,64%	16,42%	3,17%	17,08%	13,97%
CV% (E)		81,07%	63,83%	31,73%	3,53%	31,67%	20,82%
Teste de Norm. (teste S-W)		0,14	0,14	0,74	0,33	0,13	0,20

FV: fonte de variação; gl: grau de liberdade; ns: não significativo; *significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; ** significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ¹Para atender pressuposição de normalidade (p-valor $\geq 0,05$) os dados foram transformados conforme Wicklin (2011); ²EUt: gl fator dose (3) e D x E (9).

EA: eficiência agronômica; EF: eficiência fisiológica; EP: eficiência de produção; EU: eficiência de uso; EAb: eficiência de absorção; EUt: eficiência de utilização. CV%: coeficiente de variação; Norm.: normalidade; teste S-W: teste de Shapiro-Wilk.

A EA, que diz respeito ao aumento da produtividade de colmos obtida por kg de NPK aplicado, apesar de não ter apresentado médias estatisticamente diferentes, teve mínima eficiência registrada em 1,5DR-135DAE (-16,04 kg kg⁻¹), quando a aplicação de nutrientes reduziu a produtividade, e máxima em 0,5DR-105DAE (58,73 kg kg⁻¹) (Tabela 25). Em solos de fertilidade construída, cujos teores de nutrientes estão em níveis altos ou muito altos e

cultivados com espécies menos exigentes, a produtividade tende a equiparar ou até superar àquela alcançada quando se pratica a adubação (RESENDE et al., 2016). Neste experimento, embora em ODR a produtividade de colmos tenha sido inferior às obtidas com as demais doses, esta diferença não foi tão expressiva, assim como no acúmulo de nutrientes, onde os resultados foram estatisticamente iguais. A EF e EP, que relacionam o aumento da produção de biomassa e de colmos obtidas por kg de nutriente absorvido, respectivamente, apresentaram a mesma tendência que a EA (Tabela 25).

Tabela 25. Médias de eficiência agrônômica (EA), fisiológica (EF) e de produção (EP) de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliadas em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).

EA (kg kg ⁻¹)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (dose)
0,5DR	53,46 (4,67) ^{±0,27}	58,73 (3,90) ^{±0,49}	55,57 (4,09) ^{±0,27}	27,32 (3,41) ^{±0,56}	48,77 (4,01)^{±0,22} a
1,0DR	31,59 (3,18) ^{±0,49}	29,13 (3,80) ^{±0,08}	35,65 (3,64) ^{±0,30}	10,95 (2,41) ^{±0,44}	19,88 (3,42)^{±0,18} a
1,5DR	40,13(3,24) ^{±0,55}	29,57 (3,47) ^{±0,35}	25,89 (3,28) ^{±0,32}	-16,04 (3,68) ^{±0,24}	26,83 (3,26)^{±0,15} a
Média (DAE)	41,72 (3,69)^{±0,26} A	39,14 (3,72)^{±0,17} A	39,04 (3,67)^{±0,16} A	7,41 (3,16)^{±0,24} A	
	DMS DxE= (1,52)	DMS ExD= (1,23)	DMS D= (0,53)	DMS E= (0,88)	
EF (kg kg ⁻¹)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (dose)
0,5DR	20,13 (1,23) ^{±0,18}	-79,49 (1,02) ^{±0,54}	20,21 (1,23) ^{±0,29}	71,34 (1,80) ^{±0,26}	8,05 (3,78)^{±0,15} a
1,0DR	28,32 (1,28) ^{±0,46}	39,93 (1,56) ^{±0,66}	14,59 (0,83) ^{±0,67}	-27,48 (1,09) ^{±0,46}	13,84 (3,16)^{±0,13} a
1,5DR	74,73 (1,60) ^{±0,50}	49,04 (1,28) ^{±0,44}	60,86 (1,36) ^{±0,48}	3,83 (0,47) ^{±0,55}	47,12 (3,27)^{±0,18} a
Média (DAE)	41,06(3,47)^{±0,20} A	-3,17 (4,01)^{±0,25} A	31,89 (2,88)^{±0,26} A	15,90 (3,25)^{±0,30} A	
	DMS DxE= (1,15)	DMS ExD= (0,98)	DMS D= (0,51)	DMS E= (0,66)	
EP (kg kg ⁻¹)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (dose)
0,5DR	151,61(4,79) ^{±0,32}	2,62(4,30) ^{±0,71}	42,13(3,65) ^{±0,22}	119,24(4,07) ^{±0,72}	77,59 (4,21)^{±0,74} a
1,0DR	51,25(3,85) ^{±0,45}	73,06(3,96) ^{±0,44}	13,17(3,45) ^{±0,50}	-72,27(4,43) ^{±0,50}	16,30 (3,93)^{±0,18} a
1,5DR	230,72(4,39) ^{±0,87}	95,08(5,05) ^{±0,66}	141,17(4,59) ^{±0,55}	8,46(3,09) ^{±0,43}	118,86 (4,28)^{±0,23} a
Média (DAE)	144,52 (4,34)^{±0,29} A	55,17 (4,44)^{±0,30} A	65,49 (3,90)^{±0,23} A	18,47 (3,86)^{±0,29} A	
	DMS DxE= (1,57)	DMS ExD= (1,26)	DMS D= (0,52)	DMS E= (0,91)	

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna e maiúsculas na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância. Numeração sobrescrita indica o erro padrão da média. Valores entre parênteses refletem a média transformada, conforme Wicklin (2011).

EA: eficiência agrônômica; EF: eficiência fisiológica; EP: eficiência de produção; DR: dose recomendada; DAE: dias após emergência; DMS: diferença mínima significativa; DxE: desdobramento da dose dentro de épocas de colheita; ExD: desdobramento da época de colheita dentro de doses ; E: época de colheita; D: dose.

Além das questões inerentes à fertilidade do solo, as condições climáticas (Tabela 11) podem ter afetado a absorção de nutrientes e o processo de fotossíntese, respondendo por parte da alta variabilidade destes indicadores de eficiência nutricional. Neste aspecto, Resende et al.

(2016) relataram que, mesmo em solos de fertilidade construída, cereais de inverno tendem a ser mais exigentes nutricionalmente do que os cereais de verão, em razão da dificuldade em obter nutrientes em condições de baixa temperatura e de estresse hídrico que estas plantas estão submetidas durante a estação de cultivo.

Ramos (2014) desenvolveu um estudo sobre a eficiência nutricional de N na cultura do sorgo sacarino, aplicando doses de 0, 40, 80, 120 e 160 kg ha⁻¹ em quatro cultivares, na região de Orindiúva-SP, em Latossolo Vermelho Amarelo, com características de fertilidade média (M.O.: 13 g dm⁻³; P_{resina}:19 mg dm⁻³; K: 2,3 mmol_c dm⁻³; V: 59%). As médias de EA, EF e EP foram de 119,82; 126,71; e 156 kg kg⁻¹, respectivamente, superiores as observadas neste experimento, considerando apenas a eficiência da adubação nitrogenada (88,27; 45,81; e -6,24 kg kg⁻¹, respectivamente). Além disso, o autor observou decréscimo, para todos os indicadores de eficiência nutricional, à medida que houve o aumento de doses de N. No entanto, neste trabalho, observou-se esta tendência apenas para EA, EU e EAb (Tabelas 25 e Tabela 26).

Os resultados reportados por Ramos (2014) sugerem a superioridade dos genótipos no uso de nutrientes em relação ao híbrido testado por este trabalho, ou o fato de que a diminuição da eficiência nutricional, em solos de fertilidade construída, está intimamente relacionada com a lei de incrementos decrescentes. Quando há baixas produtividades, a eficiência do uso de nutrientes é alta porque qualquer aumento na quantidade do nutriente aplicado pode gerar uma grande resposta em produtividade.

Com o aumento contínuo do fornecimento de nutrientes, os rendimentos continuam a aumentar, apesar de a uma taxa mais lenta, e normalmente ocorre um decréscimo na eficiência nutricional (ROBERTS, 2008). Comprometer a produtividade dos sistemas agrícolas em detrimento da eficiência nutricional é inviável econômica e ambientalmente. Por isso, muitos autores têm preconizado a maximização da eficácia do uso de nutrientes, adotando as Boas Práticas para Uso Eficiente de Fertilizantes (BPUFs) (FIXEN, 2006; ROBERTS, 2008). Estudos sobre eficiência nutricional envolvem principalmente o N, elemento sujeito à várias rotas de perda no ambiente agrícola (erosão, lixiviação, volatilização e desnitrificação), em função do manejo inadequado de fontes, doses e épocas de aplicação inadequadas (FAGERIA; BALIGAR, 2005).

A eficiência de uso (EU), também denominada por alguns pesquisadores como fator parcial de produtividade, relaciona a quantidade do produto final da cultura, representado pela produtividade de colmos, no caso do sorgo sacarino, pela quantidade de nutrientes aplicados. Como esperado, a 0,5DR foi a que obteve maior relação de EU (398,46 kg de PC por kg de

NPK aplicado), mais que o dobro da 1,0DR e 1,5DR (Tabela 26). O modelo de regressão ajustado foi o quadrático, que explicou 100 % da variação da EU em função das doses de NPK, permitindo inferir que a eficiência mínima de uso de nutrientes ocorreu com a aplicação de 1,42DR (156-114-170 kg de NPK ha⁻¹) (Figura 20-A).

Tabela 26. Médias de eficiências de uso (EU), de absorção (EAb) e de utilização (EUt) de sorgo sacarino cultivado com doses crescentes de NPK em solo de fertilidade construída, avaliadas em diferentes épocas de colheita (Araras, SP, safra 2015/2016).

EU (kg kg ⁻¹)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (dose)
0,5DR	364,15 ^{±29,27}	436,79 ^{±24,47}	395,70 ^{±32,83}	397,21 ^{±43,74}	398,46^{±16,40} a
1,0DR	195,47 ^{±15,71}	218,59 ^{±9,13}	195,95 ^{±15,57}	168,91 ^{±15,19}	194,73^{±7,65} b
1,5DR	135,15 ^{±8,10}	155,16 ^{±12,52}	149,03 ^{±17,29}	134,25 ^{±7,78}	143,40^{±5,90} c
Média (DAE)	231,59^{±24,22} A	270,18^{±28,97} A	246,89^{±26,99} A	233,46^{±29,77} A	
	DMS Dx E= 90,10	DMS Ex D= 75,63	DMS D= 37,11	DMS E= 52,02	
EAb (kg kg ⁻¹)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (dose)
0,5DR	3,16 ^{±0,28}	4,78 ^{±0,26}	5,34 ^{±0,70}	3,57 ^{±0,48}	4,21^{±0,29} a
1,0DR	1,66 ^{±0,12}	2,13 ^{±0,16}	2,46 ^{±0,36}	1,72 ^{±0,32}	1,99^{±0,14} b
1,5DR	0,95 ^{±0,10}	1,74 ^{±0,25}	1,34 ^{±0,19}	1,35 ^{±0,12}	1,34^{±0,10} c
Média (DAE)	1,92^{±0,23} C	2,88^{±0,33} AB	3,05^{±0,46} A	2,21^{±0,27} BC	
	DMS Dx E= 1,36	DMS Ex D= 1,07	DMS D= 0,39	DMS E= 0,78	
EUt (kg kg ⁻¹)					
DR	90 DAE	105 DAE	120 DAE	135 DAE	Média (dose)
0DR	125,40 ^{±11,78}	116,90 ^{±8,06}	117,70 ^{±2,98}	146,35 ^{±10,48}	126,59^{±5,79} a
0,5DR	90,98 ^{±10,68}	93,00 ^{±8,62}	104,59 ^{±7,09}	93,17 ^{±9,54}	95,43^{±5,45} bc
1,0DR	82,84 ^{±7,30}	75,95 ^{±4,15}	86,25 ^{±13,90}	112,42 ^{±3,57}	89,36^{±4,82} c
1,5DR	104,31 ^{±8,52}	115,10 ^{±11,08}	103,97 ^{±7,96}	102,63 ^{±10}	106,50^{±6,14} b
Média (DAE)	100,88^{±5,79} A	100,23^{±5,45} A	103,13^{±4,82} A	113,64^{±6,14} A	
	DMS Dx E= 36,62	DMS Ex D= 33,80	DMS D= 13,71	DMS E= 18,31	

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna e maiúsculas na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância. Numeração sobrescrita indica o erro padrão da média.

EU: eficiência de utilização; EAb: eficiência de absorção; EUt: eficiência de utilização; DR: dose recomendada; DAE: dias após emergência; DMS: diferença mínima significativa; Dx E: desdobramento da dose dentro de épocas de colheita; Ex D: desdobramento da época de colheita dentro de doses; E: época de colheita.

A eficiência de utilização de nutrientes (EUt), que diz respeito a produção de colmos obtida por kg de nutriente absorvido, foi maior nas plantas cultivadas em 0DR (126,59 kg de PC por kg de NPK absorvido) (Tabela 26). Esperava-se que em 1,5DR o índice EUt fosse inferior a 0,5 e 1,0DR, contudo, em razão de ter produzido mais colmos (66.680 kg ha⁻¹) e ter praticamente obtido a mesma extração de nutrientes destas doses (Tabela 21). O modelo de regressão ajustado para a EUt também foi o quadrático, que explicou 99% da variabilidade em função das doses de NPK, sendo a eficiência mínima de utilização de nutrientes obtida com a aplicação de 0,89DR (98-71-107 kg de NPK ha⁻¹) (Figura 20-B).

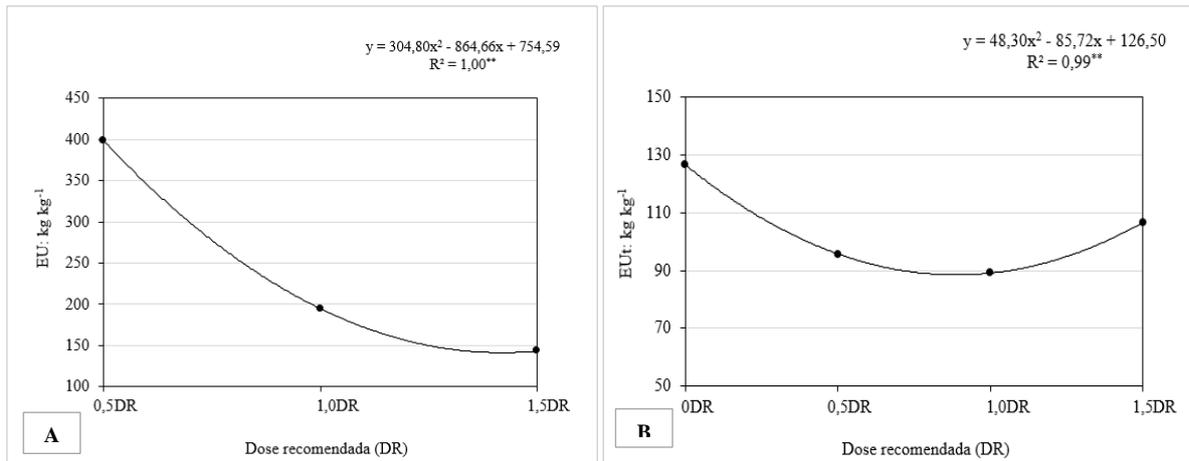


Figura 20. Gráfico da regressão ajustada à EU (A) e à EUt (B) em função de doses crescentes de NPK (Araras, SP, safra 2015/2016).

A eficiência de absorção de nutrientes (EAb), que relaciona a quantidade absorvida pelas plantas em razão da quantidade de nutrientes aplicados no solo, ora denominada de eficiência de recuperação ou balanço de nutrientes, foi o único indicador que apresentou médias significativas para os fatores dose e época de colheita (Tabela 24). A EAb foi cerca de duas vezes maior no tratamento com aplicação de 0,5DR de NPK (Tabela 26). Plantas colhidas em 120DAE foram aquelas que expressaram maior eficiência de absorção (Tabela 26), provavelmente pelo maior acúmulo de K nesta fase (Tabela 21). Tanto para o fator dose quanto para época de colheita, ajustaram-se o modelo de regressão quadrático. A dose que resultou em mínima EAb foi 1,46DR (161-117-175 kg de NPK ha⁻¹) (Figura 21-A). A época de colheita para máxima EAb foi estimada pelo modelo em 114 DAE (Figura 21-B).

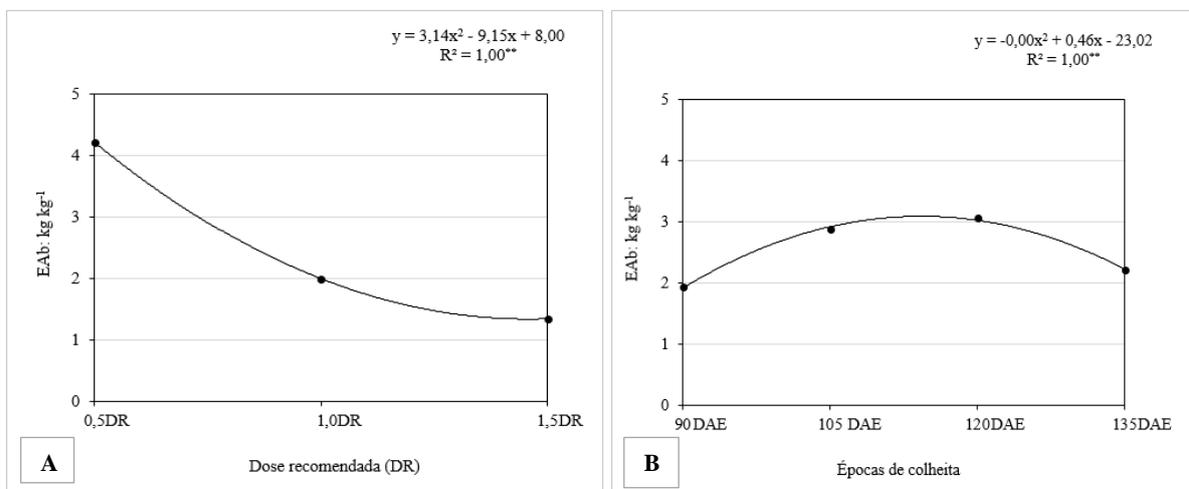


Figura 21. Gráfico da regressão ajustada para EAb em função de doses crescentes de NPK (A) e épocas de colheita (B) (Araras, SP, safra 2015/2016).

Pela ótica do balanço de nutrientes, como os índices de EAb foram, em média, maiores que 1, a interpretação indica que os nutrientes estão sendo mais removidos do que aplicados. Por isso, esta extração pode causar o esgotamento da fertilidade do solo (NORTON, 2017). Neste aspecto, Resende et al. (2016) indicaram que, para que não ocorra depleção das reservas de nutrientes do solo de fertilidade construída, é importante que as adubações sejam baseadas na filosofia de reposição, restituindo o que foi exportado pelas colheitas. No entanto, se o objetivo for buscar metas mais elevadas de produtividade, o aporte de nutrientes no sistema precisará ser maior que a exportação, sendo importante o acompanhamento econômico para atestar a viabilidade da adubação.

Em solo de fertilidade construída, é esperado que a eficiência seja menor, uma vez que no cálculo dos indicadores há o desconto dos resultados obtidos no tratamento sem adubação, onde em um solo de alta fertilidade, a diferença é pouco significativa entre as parcelas adubadas com quantidades variáveis, podendo ser até superior. Desta maneira, a EUt foi o indicador que mostrou com mais clareza o desempenho da cultura em solo de fertilidade construída, ou seja, o quanto foi produzido de colmos por unidade de nutrientes absorvidos.

Estudos demonstraram que as variações quanto ao uso de nutrientes estão relacionadas a capacidade de absorção, translocação, cinética de absorção, morfologia do sistema radicular, atividade enzimática e benefícios de associações simbióticas (MACHADO; MACHADO; FURLANI, 2004). Citando como exemplo o P, cuja disponibilidade é dependente dos atributos físicos, químicos, mineralógicos e microbiológicos dos solos, os mecanismos morfológicos de adaptação das plantas em situação de estresse nutricional estão relacionados com maior superfície de contato com o solo, desenvolvendo sistemas radiculares extensos, de elevada área superficial e comprimento (MACHADO; MACHADO; FURLANI, 2004).

4.5. A fertilidade das áreas cultivadas com cana-de-açúcar

O sorgo sacarino tem se mostrado apto para ser cultivado em áreas de reforma de canaviais, com intuito de fornecer matéria-prima para abastecer o mercado de etanol na entressafra da cana-de-açúcar (MAY et al., 2013). Segundo a CONAB (2018), a área plantada com cana-de-açúcar na região Centro-Sul foi de 1.100.400 ha, sendo 600.700 ha de plantio localizado no Estado de São Paulo, o que permite dimensionar o potencial de expansão do cultivo do sorgo sacarino.

A estimativa da fertilidade do solo das áreas de reforma de cana-de-açúcar foi elaborada a partir de dados disponíveis por município extraídos da publicação “Resultados do Levantamento da Fertilidade dos Solos do Estado de São Paulo” (PROCHNOW et al., 2018). Os municípios selecionados foram aqueles que apresentaram em 2015 área plantada com cana-de-açúcar igual ou superior a 90% da área agrícola total, conforme a Pesquisa Agrícola Municipal (PAM-IBGE, 2018).

Tabela 27. Municípios selecionados para elaboração da estimativa da fertilidade de áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Fonte: adaptado de Prochnow et al. (2018); PAM-IBGE (2018).

Município	Área plantada com cana-de-açúcar	Área agrícola total	% da área	pH	P	K	V%
	ha	ha		CaCl ₂	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³	
Adamantina	12.950	13.881	93,29	4,9	11,0	1,4	54,5
Agudos	14.632	15.164	96,49	4,6	9,0	0,9	43,0
Altair	30.000	30.969	96,87	5,6	10,3	2,3	65,0
Andradina	31.500	34.258	91,95	5,0	7,0	1,4	55,0
Areiópolis	6.050	6.282	96,31	5,1	8,0	1,0	46,0
Bocaina	18.000	18.332	98,19	5,3	9,6	1,5	55,0
Borborema	30.600	33.171	92,25	5,3	7,1	2,0	63,0
Borebi	6.796	6.819	99,66	5,0	8,6	1,0	48,0
Cafelândia	29.853	30.977	96,37	4,9	17,6	1,6	49,0
Capivari	22.901	23.000	99,57	4,9	25,0	1,1	56,0
Charqueada	11.300	11.459	98,61	4,7	6,0	2,0	34,5
Colina	28.900	30.800	93,83	5,2	10,0	1,6	46,0
Colômbia	38.000	41.010	92,66	5,4	18,2	1,6	61,4
Descalvado	32.000	32.071	99,78	5,5	14,0	1,3	62,7
Dracena	13.400	14.257	93,99	5,0	9,9	1,4	51,5
Elias Fausto	12.500	13.385	93,39	4,9	33,0	1,2	56,0

...continua

Fernandópolis	14.000	14.000	100	5,5	14,0	2,0	65,7
Flórida Paulista	18.000	18.838	95,55	4,8	10,0	2,1	56,0
Getulina	21.524	23.144	93	5,2	7,0	1,2	54,0
Guapiaçu	17.959	19.510	92,05	5,2	8,8	1,9	59,1
Guaraci	39.900	41.083	97,12	5,0	8,6	1,4	53,1
Iacanga	16.218	16.948	95,69	5,5	8,0	1,8	60,0
Inúbia Paulista	3.400	3.660	92,9	5,0	15,0	1,7	57,0
Ipeúna	5.700	6.140	92,83	4,8	5,0	0,9	34,0
Itajobi	29.000	30.018	96,61	5,2	7,3	2,2	63,2
Junqueirópolis	28.400	28.924	98,19	5,0	8,7	1,5	62,0
Lençóis Paulista	36.500	37.695	96,83	5,0	10,0	0,8	52,0
Lins	31.200	31.863	97,92	4,9	6,0	1,2	51,0
Lucélia	7.620	7.685	99,15	5,1	11,0	3,0	63,0
Macatuba	13.336	13.950	95,6	5,1	15,0	0,9	57,0
Monte Aprazível	20.000	21.968	91,04	5,0	7,7	1,9	53,0
Monte Azul Paulista	11.900	12.804	92,94	5,4	15,6	3,1	61,3
Nova Aliança	10.000	10.875	91,95	5,1	15,5	3,0	53,1
Novo Horizonte	39.600	42.931	92,24	5,4	9,5	1,9	53,7
Olímpia	45.000	46.734	96,29	5,2	7,0	1,7	40,5
Onda Verde	8.500	9.070	93,72	5,6	7,3	1,5	65,0
Oswaldo Cruz	4.050	4.376	92,55	5,0	21,0	1,9	56,0
Paranapuã	3.400	3.635	93,54	5,2	21,9	2,5	58,0
Pederneiras	37.561	41.073	91,45	5,1	8,0	1,2	56,0
Piracicaba	49.000	51.731	94,72	5,2	10,0	1,7	62,0
Pirangi	10.500	11.189	93,84	5,3	10,2	2,1	63,8
Pitangueiras	35.000	36.765	95,2	5,5	13,5	2,1	51,0
Pontal	26.167	29.068	90,02	5,4	14,0	2,0	50,0
Porto Feliz	14.500	15.399	94,16	4,7	16,0	1,4	56,0
Potirendaba	16.000	17.746	90,16	5,3	9,5	2,0	58,3
Pratânia	9.000	9.400	95,74	4,9	27,1	1,2	50,9
Ribeirão Preto	37.104	38.546	96,26	5,2	14,0	1,1	46,0
Sta. Cruz das Palmeiras	19.651	20.616	95,32	5,5	21,0	1,8	57,4
São José do Rio Preto	6.500	6.975	93,19	5,1	8,6	1,5	57,3
São Manuel	32.000	32.190	99,41	5,3	11,7	1,0	57,2
São Pedro	12.300	12.543	98,06	5,0	6,0	1,1	49,0
Sertãozinho	30.000	33.000	90,91	5,5	20,0	2,7	56,0
Severínia	7.400	7.620	97,11	5,7	18,7	3,4	71,4
Tanabi	30.000	31.834	94,24	5,1	7,3	1,2	54,0
Taquaritinga	28.000	30.695	91,22	5,3	13,8	1,6	64,0
Terra Roxa	15.700	16.651	94,29	5,1	17,0	1,0	47,0
Uchoa	15.000	15.451	97,08	5,1	16,2	2,3	55,1
Urupês	15.500	16.268	95,28	5,5	40,4	2,4	65,3
Viradouro	15.600	16.553	94,24	5,7	13,9	2,0	56,0
Votuporanga	8.387	9.152	91,64	5,6	16,6	1,6	65,0

Total (ha)	1.235.459	1.302.151	-	-	-	-	-
Média	20.591	21.703	94,91	5,2	13,0	1,7	55,4
Mínimo	3.400	3.635	90,02	4,6	5,0	0,8	34,0
Máximo	49.000	51.731	100	5,7	40,4	3,4	71,4
Desvio padrão	11.726	12.368	2,67	0,3	6,7	0,6	7,4
Erro padrão da média	1.514	1.597	0,3	0,03	0,9	0,1	1,0

Os municípios selecionados localizaram-se, em sua maioria, nas regiões nordeste, centro-oeste e oeste do Estado de São Paulo, conforme ilustra a Figura 22.

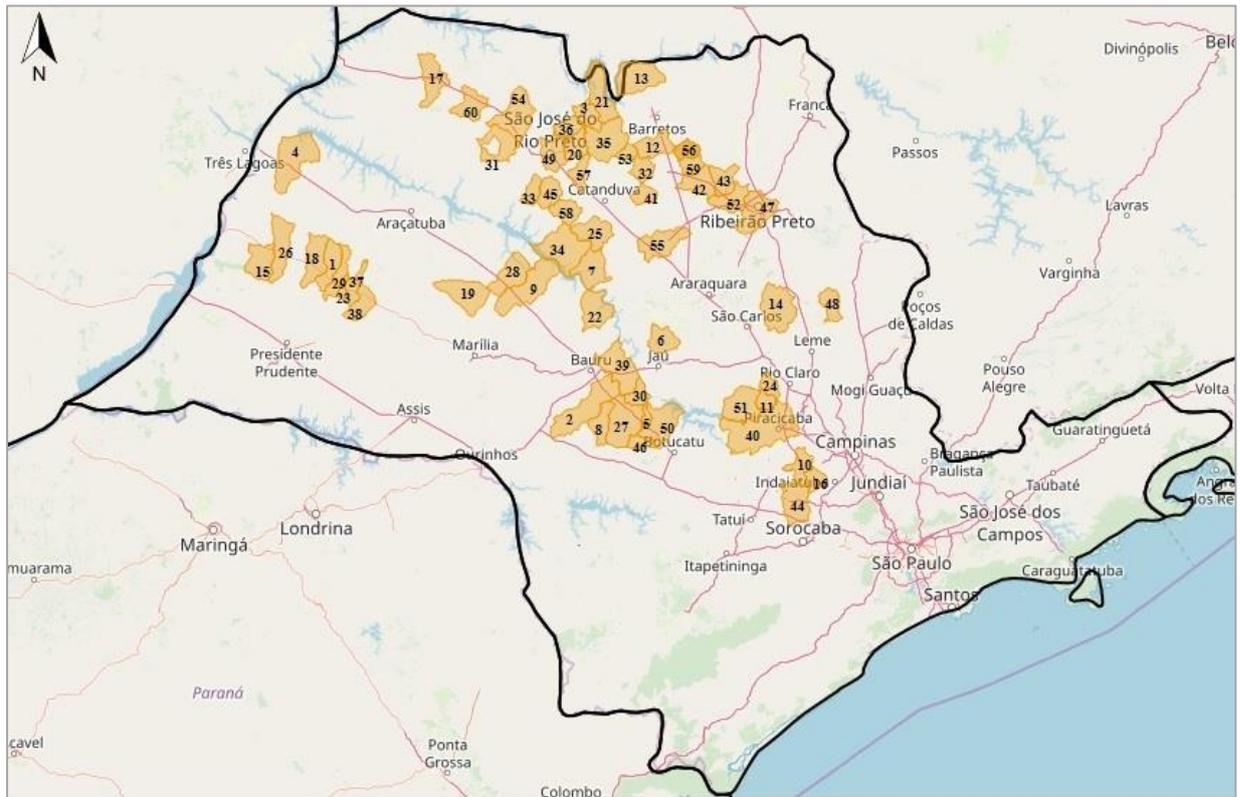


Figura 22. Localização, no Estado de São Paulo, dos municípios selecionados para a estimativa da fertilidade de áreas cultivadas com cana-de-açúcar. 1. Adamantina; 2. Agudos; 3. Altair; 4. Andradina; 5. Areiópolis; 6. Bocaina; 7. Borborema; 8. Borebi; 9. Cafelândia; 10. Capivari; 11. Charqueada; 12. Colina; 13. Colômbia; 14. Descalvado; 15. Dracena; 16. Elias Fausto; 17. Fernandópolis; 18. Flórida Paulista; 19. Getulina; 20. Guapiaçu; 21. Guaraci; 22. Iacanga; 23. Inúbia Paulista; 24. Ipeúna; 25. Itajobi; 26. Junqueirópolis; 27. Lençóis Paulista; 28. Lins; 29. Lucélia; 30. Macatuba; 31. Monte Aprazível; 32. Monte Azul Paulista; 33. Nova Aliança; 34. Novo Horizonte; 35. Olímpia; 36. Onda Verde; 37. Osvaldo Cruz; 38. Paranapuã; 39. Pederneiras; 40. Piracicaba; 41. Pirangi; 42. Pitangueiras; 43. Pontal; 44. Porto Feliz; 45. Potirendaba; 46. Pratânia; 47. Ribeirão Preto; 48. Santa Cruz das Palmeiras; 49. São José do Rio Preto; 50. São Manuel; 51. São Pedro; 52. Sertãozinho; 53. Severínia; 54. Tanabi; 55. Taquaritinga; 56. Terra Roxa; 57. Uchoa; 58. Urupês; 59. Viradouro; 60. Votuporanga.

Fonte: adaptado de IPMet-UNESP (2018).

Os teores de matéria orgânica mais frequentes (Figura 23-A) situaram-se entre 20,01 a 40 g dm⁻³ (65,17%), dentro da faixa considerada média, indicando que a colheita da cana crua tem colaborado para o aporte de material orgânico nestes solos. Segundo Canellas et al. (2007), com a adoção do sistema de colheita sem a queima da cana-de-açúcar, a estocagem de carbono no solo pode aumentar até 40% na camada superficial e até 35% em subsuperfície.

A acidez destes solos, representada pelo pH em CaCl₂, esteve com mais frequência nas faixas de média (56,67%) e de alta acidez (31,46%) (Figura 23-B), o que indica, portanto, que são solos com potencial de resposta à calagem. Por ser uma cultura semi-perene, é na ocasião do plantio, que ocorre a cada 5 ou 6 anos, que a cana-de-açúcar recebe a aplicação de calcário com incorporação mais profunda. Por isso, com o decorrer dos cortes, há queda acentuada do pH do solo e, conseqüentemente, a indisponibilidade da maioria dos nutrientes (Morelli et al., 1987; Oliveira, 2012).

Os teores de P enquadraram-se, na maioria das amostras, na classe de baixa disponibilidade, entre 7 a 15 mg dm⁻³ (65%) (Figura 23-C), mostrando potencial de resposta a este elemento. A situação dos solos cultivados com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo ainda apresenta restrições consideráveis de P, face à sua baixa disponibilidade natural e à afinidade com a fração mineral através de processos químicos de adsorção e de precipitação de compostos insolúveis, que induzem à formação de fosfatos de cálcio em solos alcalinos e de fosfatos de ferro e de alumínio em solos ácidos (ALMEIDA JÚNIOR et al., 2011).

A saturação por bases (V%), que diz respeito à proporção da CTC total ocupada por cátions trocáveis, situou-se, em sua maioria (78,33%), na faixa considerada média (50-70%) (Figura 23-D), atendendo a demanda da cana-de-açúcar (V%=60). Ao longo da exploração agrícola, os teores dos nutrientes tendem a diminuir, sobretudo as bases, e mais rapidamente nos solos de baixa CTC (DEMATTE, 2004). No entanto, os resultados mostraram que o setor sucroenergético tem investido na aplicação de calcário e gesso para minimizar as limitações de baixa fertilidade e de toxidez por alumínio.

O teor de K⁺ nos solos cultivados com cana-de-açúcar esteve com mais frequência nas faixas de baixa (45,00%) e média disponibilidade (51,67%) (Figura 23-E). A aplicação da vinhaça pode responder pelos valores satisfatórios de K, uma vez que esta prática tem sido associada à melhoria da fertilidade do solo, pelo fornecimento de nutrientes e incremento de matéria orgânica (BARROS et al., 2010). Entretanto, o excesso do uso da vinhaça pode causar sérios problemas ambientais, como contaminação de águas subterrâneas e prejudicar a

qualidade da matéria-prima, com a diminuição de açúcares no caldo e aumento no teor de cinzas (PAULINO et al., 2002; SOARES; CASAGRANDE; NICOLOSO, 2014).

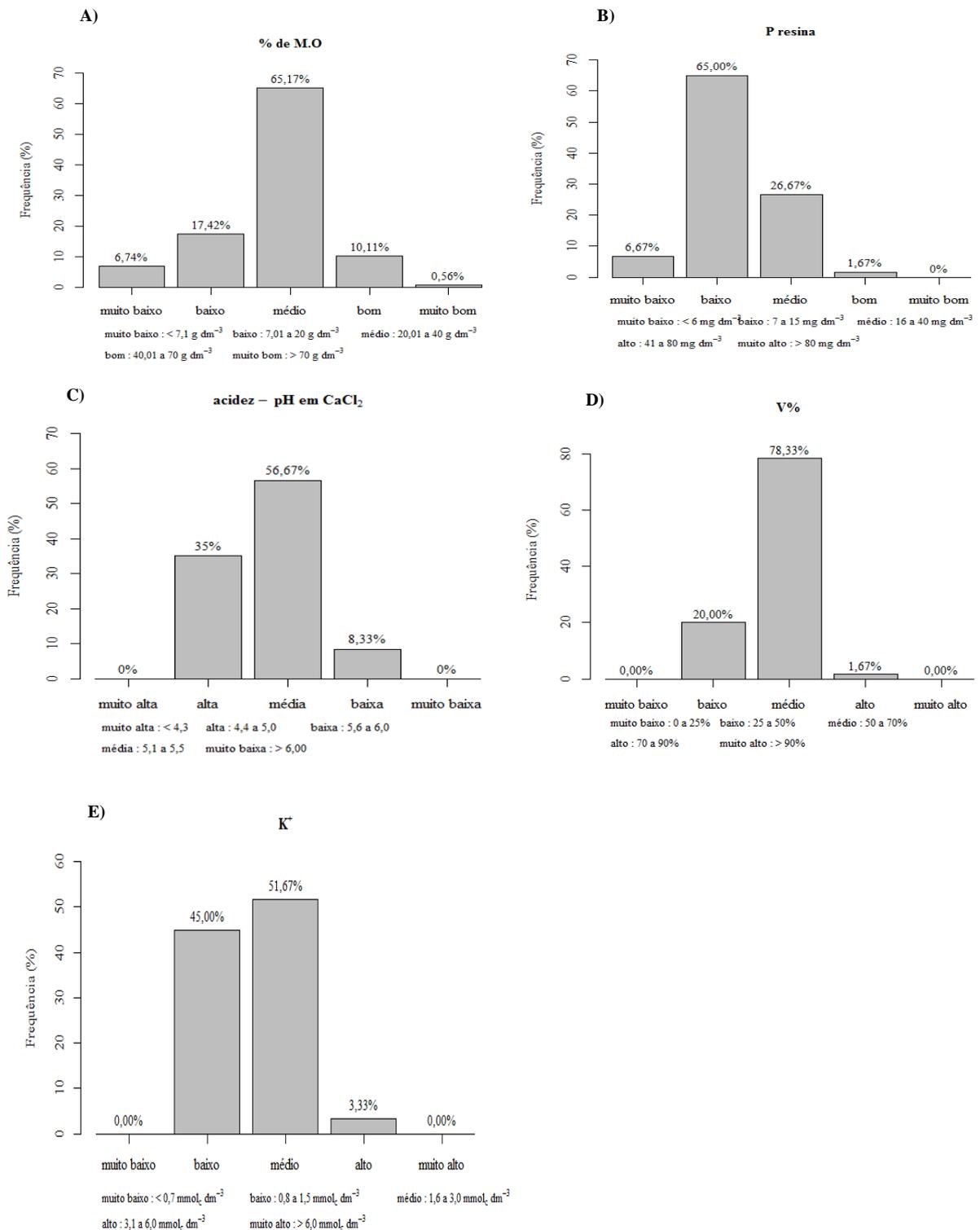


Figura 23. Estimativa da fertilidade do solo de áreas de reforma de cana-de-açúcar a partir dos parâmetros de matéria orgânica (M.O.) (A), acidez, representada através do pH em CaCl₂ (B), P resina (C), saturação por bases (V%) (D) e K⁺ (E).

Com exceção do P, a fertilidade de áreas cultivadas com cana-de-açúcar pode ser considerada média. Cabe ressaltar que alguns dos municípios selecionados, com 90% ou mais do território agrícola ocupado com cana-de-açúcar estão localizados no Oeste paulista, região em que predominam as classes de solos Latossolo Vermelho-Amarelo, Argissolo Vermelho-Amarelo, Argissolo Vermelho e Neossolo Quartzarênico, apresentando textura média ou arenosa, com tendência à baixa fertilidade (QUARESMA; PEREZ FILHO, 2010). Desta forma, pode-se dizer, baseando nos conceitos preconizados na Figura 4, que a fertilidade das áreas de cana-de-açúcar está em processo de construção, com possibilidade de resposta à aplicação de nutrientes entre 75% e 90% da produtividade relativa.

Neste estudo, com o cultivo de sorgo sacarino em talhão com histórico de produção de grãos e fertilidade construída, foi observado respostas significativas a aplicação de doses crescentes de NPK, porém inviáveis economicamente. Desenvolver pesquisas que avaliam a curva de resposta do sorgo sacarino à adubação em áreas de reforma de cana-de-açúcar são necessárias para reafirmar a competitividade da cultura frente ao mercado de biocombustíveis.

5. CONCLUSÕES

A adubação com doses crescentes de NPK promoveu alterações nas variáveis de crescimento e produtividade do sorgo sacarino, mas sem alterar seu ponto ótimo de colheita. Embora a produtividade de colmos tenha respondido significativamente a aplicação de NPK, os resultados evidenciaram que não adubar seria a prática mais econômica, em virtude da alta produtividade obtida na ausência de adubação.

Para as características industriais, sobretudo para o conteúdo de sacarose e ATR, doses reduzidas de NPK prolongaram o ponto ótimo de colheita (110-120DAE) do sorgo sacarino. A melhor opção de manejo foi com a oferta da dose recomendada de fertilizantes (110-80-120 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente). O híbrido de sorgo sacarino acumulou NPK na ordem de N>K>P (em média, 319,89; 272,53; 28,59 kg ha⁻¹, respectivamente).

A eficiência de uso de nutrientes (EUN) foi maior nos tratamentos cuja oferta de NPK foi menor. As áreas cultivadas com cana-de-açúcar indicaram fertilidade média e em processo de construção, o que constitui cenários promissores para respostas do sorgo sacarino à aplicação de nutrientes, ou inclusive, através de apontamentos de estudos de viabilidade técnica e econômica, permitir o cultivo do sorgo sacarino sem adubação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABVE-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO. **Toyota anuncia novo Prius elétrico híbrido a etanol**. Disponível em: <<http://www.abve.org.br/toyota-anuncia-prius-eletrico-hibrido-a-etanol/>> Acesso em: 25 jun. 2018.

ALMEIDA, V.P.; LONGHI, G.M.; SANTOS, L.R. Etanol: 40 anos de evolução do mercado de combustíveis e automóveis no Brasil. **Teoria e Evidência Econômica**, n. 49, p. 462-484, jul./dez. 2017.

ALMEIDA JÚNIOR, A. B.; NASCIMENTO, C. W. A.; SOBRAL, M. F.; SILVA, F. B. V.; GOMES, W. A. Fertilidade do solo e absorção de nutrientes em cana-de-açúcar fertilizada com torta de filtro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 10, p. 1004-1013, 2011.

ALMODARES, A.; TAHERI, R.; CHUNG, M.; FATHI, M. The effect of nitrogen and potassium fertilizers on growth parameters and carbohydrate content of sweet sorghum cultivars. **Journal of Environmental Biology**, Pakistan, v.29, p.849-852, 2008.

ALVAREZ V. V.H.; NOVAES, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A.S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARAES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5º Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 25-32.

AMANULLAH, B.; HASSAN, M.J.; NAWAB, K.; ALI, A. Response of Specific leaf Area (SLA), Leaf Area Index (LAI) and Leaf Area Ratio (LAR) of Maize (*Zea mays* L.) to plant density, rate and timing of nitrogen application. **World Applied Sciences Journal**, Dubai, v.2, n.3, p. 235-243, 2007.

ANDERSEN, M.N.; JENSEN, C.R.; LÖSCH, R. The interaction effects of potassium and drought in field-grown barley. I. yield, water-use efficiency and growth. **Soil Plant Science**, v.42, p. 34-44, 1992.

ARAÚJO, D.K.; CAMARGO, M.E.A. de; MACEDO, W.R.; MENDES, A.C.C.M.; CASTRO, P.R.de C. e. Efeito de Agroquímicos no Desenvolvimento de Sorgo Sacarino. In: XXIX CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO. **Anais do 29º Congresso Nacional de Milho e Sorgo**, Águas de Lindóia-SP, 2012.

BARROS, R. P.; VIÉGAS, P. R. A.; SILVA, T. L.; SOUZA, R. M.; BARBOSA. L.; VIÉGAS, R. A.; BARRETTO, M. C.V.; MELO, A. S. Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.40, p.341-346, 2010.

BENITES, V. M.; CARVALHO, M. C. S.; RESENDE, A. V.; POLIDORO, J. C.; BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, F. A. Potássio, cálcio e magnésio. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Org.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: Nutrientes**. 1.ed. Piracicaba: IPNI Brasil, 2010, v. 2. p. 133-204.

BLAIR, G.J.; MAMARIL, C.P.; MILLER, M.H. Influence of nitrogen source on phosphorus uptake by corn from soils differing in pH. **Agronomy Journal**, v.63, p.235-238, 1971.

BOLONHEZI, D; FREITAS, R.S.; SAWAZAKI, E. Sorgo sacarino e sorgo biomassa. In: Aguiar et al. (Ed.) **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas**. Campinas: Instituto Agronômico, 2014. p. 377-379. (Boletim 200).

BOLONHEZI, D.; CARDOSO, B.M.V.; CARVALHO, E.V. de; SOUZA JR, T.G. de A.; GARCIA, J.C. Características tecnológicas de sorgo sacarino e biomassa em diferentes estádios fenológicos. In: III SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA SUCROENERGÉTICA E DE BIOCOMBUSTÍVEIS,7, 2015, Jaboticabal. **Anais...**Jaboticabal, 2015.

BORGONNOVI, R.A.; GIACOMINI, F.S.; SANTOS, H.L.; FERREIRA, A.S.; WAQUIL, J.M.; SILVA, J.B.; CRUZ, I. **Recomendações para o plantio de sorgo sacarino**. Sete Lagoas, Embrapa:CNPMS, 1982, p. 16. (Circular Técnica 08).

BOX, G. EP; COX, D. R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Statistical Society**. Series B (Methodological), p. 211-252, 1964.

BRUUSLEMA, T.; WITT, C. GARCIA, F.; LLS.; RAO,T.N. ;CHEN,F.; IVANOVA, S.A. Global framework for fertilizer BMPs. **Better Crops**, v.92, n.2, p.13-15, 2008.

CALONEGO, J.C.; FOLONI, J.S.S.; ROSOLEM, C.A. Lixiviação de potássio da palha de plantas de cobertura em diferentes estádios de senescência após a dessecação química. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29, p. 99-108, 2005.

CÂMARA, G.M.S. Fenologia é ferramenta auxiliar de técnicas de produção. **Visão Agrícola**, n.5, p. 63-66, 2006.

CAMPOS, A.T.; CAMPOS, A.T. Balanços energéticos agropecuários: uma importante ferramenta como indicativo dos agrossistemas. **Ciência Rural**, v.34, p. 1977-1985, 2004.

CANELLAS, L.P.; BALDOTTO, M.A.; BUSATO, J.G.; MARCIANO, C.R.; MENEZES, S.C.; SILVA, N.M.; RUMJANEK, V.M.; VELLOSO, A.C.X.; SIMÕES, M.L.; MARTINNETO, L. Estoque e qualidade da matéria orgânica de um solo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p. 331-340, 2007.

CANTARELLA, H. C.; RAIJ, B.V.; CAMARGO, C. E. O. Cereais. In: RAIJ, B.V. et al. **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2 ed. Campinas: Instituto Agronômico: Fundação IAC, 1997.p.45 -49.

CARLUCCI, M.V.; RAMOS, M.T.B. Influência da deficiência hídrica no florescimento e características tecnológicas da cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 24, p.46-466, 1989.

CARMO, J.B. FILOSO, S; ZOTELLI, L.C.; SOUSA NETO, E.R.; PITOMBO, L.M.; DUARTE-NETO, P.J.; VARGAS, P.; ANDRADE, C.A.; GAVA, G.J.; ROSSETO, R.; CANTARELLA, H.; NETO, A.E.; MARTINELLI, L. A. Infield greenhouse gas emissions

from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. **Global Change Biology Bioenergy**, v.5, p.267-280, 2013.

CARVALHO, A.P.C.; FERREIRA, R.L. A utilização de biocombustíveis como alternativa sustentável na matriz energética brasileira. **Caderno Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v.5, n.3, p. 139-157, 2014.

CASARIN, W.; STIPP, S.R. **Manejo 4C: Quatro medidas corretas que levam ao uso eficiente dos fertilizantes**. Piracicaba: IPNI, 2016. 6 p. (Informações Agrônomicas 142).

CASTRO, P.R.C.; KLUGE, R.A.; SESTARI, I. **Manual de Fisiologia Vegetal: Fisiologia de Cultivos**. Piracicaba: Editora Agronômica Ceres, 2008. 864 p.

CAVALCANTE, T.J.C. **Marcha de absorção de macro e micronutrientes nas culturas do sorgo sacarino e sorgo biomassa**. 2017. 62f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias-Agronomia) - Instituto Federal Goiano, Rio Verde, 2017.

CESAR, M.A.A; DELGADO, A.A.; CAMARGO, A.P.; BISSOLI, B.M.Z; SILVE, F.C. Capacidade de fosfatos naturais e artificias em elevar o teor de fósforo no caldo de cana-de-açúcar (cana planta), visando o processo industrial. **STAB: açúcar, álcool e subprodutos**, v.5, n. 5-6, p.32-38, 1987.

CHANNAPPAGOUDAR, B. B. ; BIRADAR, N.R.; PATIL, J.B.; HIIREMATH, S.M. Assessment of sweet sorghum genotypes for cane yield, juice characters and sugar levels. **Karnataka Journal of Agricultural Sciences**, v.20, n.2, p. 294-296, 2007.

CIAMPITTI, I.A. **Sorghum Growth and Development**. Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service (2014). Disponível em: <<https://www.bookstore.ksre.ksu.edu/pubs/MF3234.pdf>> Acesso em: 05 jul. 2018.

COELHO, A.M; WAQUIL, J.M.; KARA, D.; CASELA, C.R.; RIBAS, P.M. **Seja o Doutor do seu sorgo**. Piracicaba: POTAFOS, 2002. 24 p. (Arquivo do Agrônomo,14).

COELHO, A.M. Adubação. In: MAY, A.; DURÃES, F.O.M.; PEREIRA FILHO, I.A.; SCHAFFERT, R.E.; PARRELLA, R.A.C. **Sistema Embrapa de produção agroindustrial de sorgo sacarino para bioetanol Sistema BRS1G – Tecnologia Qualidade Embrapa**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. 118 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos-139).

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Boletim da safra da cana-de-açúcar**, 4º Levantamento - Safra 2017/18. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>>. Acesso em: 02 ago. 2018.

CONSECANA. Conselho dos produtores de cana-de-açúcar, açúcar e álcool do Estado de São Paulo. **Manual de Instruções**.5ª.ed. Piracicaba, 2006. 112 p.

COSTA, C. C.; BURNQUIST, H. L. Impactos do controle do preço da gasolina sobre o etanol biocombustível no Brasil. **Estudos Econômicos**, São Paulo, v. 46, n. 4, p. 1003-1028, 2016.

COWLEY, W.R.; SIMTH, R.A. Sweet sorghum as a potential sugar crop in south Texas. **Proceedings International Society of Sugar Cane Technologists**, v.14, p.628-633, 1972.

CRUSCIOL, C.A.C. **Efeito da nutrição na maturação da cana-de-açúcar**. In: VIII SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2017, Piracicaba. Disponível em: <http://www.assocana.com.br/palestras/ORPLANA_Efeito_nutricao_maturacao_cana_de_acucar.pdf> Acesso em: 10 ago. 2018.

CRUTZEN, P.J.; MOSIER, A.R.; SMITH, K.A.; WINIWARTER, W. N₂O release from agro biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 8, p. 389-395, 2008.

CRUZ, A.C.S.; INÁCIO, R.A.C.; MORAES, R. A crise no setor sucroenergético e as empresas do município de Sertãozinho-SP. **Revista Eletrônica Diálogos Acadêmicos**, v.5, n.2, p. 114-127. jul./dez., 2013.

CUNHA, J. F.; CASARIN, V.; FRANCISCO, E. A. B.; PROCHNOW, L. I. Balanço de nutrientes na agricultura Brasileira (2009-2012). **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v. 145, p. 1-13, 2014.

DELGADO, F.; SOUSA, M. E.; ROITMAN, T. Biocombustíveis. **Cadernos FGV Energia**, n. 8, ano 4, 2017. 120 p.

DEMATTE, J.L.I. Manejo e conservação de solos, na cultura da cana. **Visão Agrícola**, v.1, p.8-17, 2004.

DINIZ, G.M.M. **Produção de Sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench): aspectos gerais**. 2010. 23f. Dissertação (Mestrado em Melhoramento Genético de Plantas). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2010.

DUTRA, E. D.; DUTRA, E.D.; BARBOSA NETO, A.G.; SOPUZA, R.B.; MORAIS JÚNIOR, J.N.T.; MENEZES, R.S.C. Ethanol Production from the Stem Juice of Different Sweet Sorghum Cultivars in the State of Pernambuco, Northeast of Brazil. **Sugar Tech**, v. 15, n. 3, p. 316-321, 2013.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sorgo sacarino a safrinha da cana-de-açúcar**. 2011. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/36027/1/Sorgo-sacarino.pdf>>. Acesso em: 30 jun. 2018.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Rio de Janeiro, 2018.

EMYGDIO, B.M. **Produção de etanol a partir de sorgo sacarino**. 2010. 2010. Artigo em Hipertexto. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2010_4/sorgo/index.htm>. Acesso em: 05 ago. 2018.

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, p.6-16, 1998.

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. **Advances in Agronomy**, v.88, p.97-185, 2005.

FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. 452 p.

FERNANDES, G.; BRAGA, T. G.; FISCHER, J.; PARRELLA, R. A. C.; RESENDE, M. M. de; CARDOSO, V. L. Evaluation of potential ethanol production and nutrients for four varieties of sweet sorghum during maturation. **Renewable Energy**, Oxford, v. 71, p. 518- 524, 2014.

FIXEN, P.E. 2006. Turning challenges into opportunities. In: PROCEEDINGS OF THE FLUID FORUM, FLUIDS: BALANCING FERTILITY AND ECONOMICS. Fluid Fertilizer Foundation, 2006, Scottsdale. **Anais...** Scottsdale, 2016.

FONTOURA, S. M. V.; VIEIRA, R. C. B.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; MORAES, R.P. Eficiência técnica de fertilizantes fosfatados em Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 6, p. 1907-1914, 2010.

FORNASIERI FILHO, D. **Manual da cultura do sorgo**. Jaboticabal: Editora FUNEP, 2009. 202p.

FRANCO, A.A.N. **Marcha de absorção e acúmulo de nutrientes na cultura do sorgo**. 2011. 74f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal), Universidade Estadual de Montes Claros, Montes Claros, 2011.

FGV - FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. **Metodologia IGP-M**. Disponível em:<<http://portalibre.fgv.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=8A7C82C54DB5CA9F014DD93B9DE914E5>> Acesso em: 10 jul. 2018.

GIANELLO, C.; WIETHÖLTER, S. Novo sistema de adubação para as culturas de grãos nos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2004, Florianópolis. **Resumos expandidos...** Florianópolis: SBCS-NRS, 2004. (CD-Rom).

GOES, T.; MARRA, R. Biocombustíveis: Uma alternativa para o mundo, uma oportunidade para o Brasil. **A Lavoura**, n. 668, p. 15-19, 2008.

GOLDEMBERG, J. Biomassa e energia. **Química Nova**, São Paulo, v.32, n.3, p.582-587, 2009.

GOMES, S.C.M.P. **Produção de etanol utilizando mix de sorgo sacarino e cana-de-açúcar em processo de maturação**. 2014.51f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia

Agropecuária) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2014.

GONÇALVES, A.O.; FAGNANI, M.A.; PERES, J.G. Efeitos da cobertura do solo com filme de polietileno azul no consumo de água da cultura da alface cultivada em estufa. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.3, p.622-631, set./dez. 2005.

HAMMAD, H.M.; AHMAD, A; FARHAD, W.; QASIM, K; SAEED, S. Nitrogen stimulates phenological traits, growth and growing degree days of maize. **Pakistan Journal of Agricultural Sciences**, v. 50, n.3, p. 337-344, 2013.

HAN, L. P.; STEINBERGER, Y.; ZHAO, Y. L.; XIE, G. H. Accumulation and partitioning of nitrogen, phosphorus and potassium in different varieties of sweet sorghum. **Field Crops Research**, v. 120, n. 2, p. 230-240, 2011.

HICKMANN, C. **Dinâmica de nitrogênio e ajustes na adubação NPK para uma sequência milho-soja-milho na região dos Campos das Vertentes, Minas Gerais**. 2014. 159f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Agrícola Municipal - PAM**. Brasília: 2018. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 01 mai. 2018.

IEA - INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. **Preços Médios Mensais Recebidos pelos Agricultores: cana-de-açúcar**. Disponível em:<http://ciagri.iea.sp.gov.br/nia1/precos_medios.aspx?cod_sis=2>. Acesso em: 01 ago. 2018.

IEA- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Outlook 2015**. OECD: Paris, 2015. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015.pdf>>. Acesso em: 05 jul. 2018.

INTL FC STONE. **Fertilizantes**. Relatório mensal, junho de 2018. Disponível em:<<https://www.intlfcstone.com/FCStone-Public-Disclosure/>>. Acesso em: 10 jul. 2018.

IPMet - Instituto de Pesquisas Meteorológicas - UNESP. **Radar IPMet**. Disponível em:<<https://www.ipmet.unesp.br/alerta/ppigis/>>. Acesso em: 12 dez. 2018.

JARDINE, J.G.; DISPATO, I.; PERES, M.R. **Indicações de aspecto tecnológico sobre o bioetanol de matéria-prima amilácea**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2009. 23 p. (Documentos, 94)

KAPPES, C.; ZANCANARO, L. Manejo da fertilidade do solo em sistemas de produção no Mato Grosso. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, **Palestras...** Sete Lagoas: ABMS, 2014. p. 358-381.

KARANDE, B.I.; VARSHNEYA, M.C.; NAIDU, T.R.V. Photoperiodically sensitive time interval for panicle initiation of sorghum. **Indian Journal of Plant Physiology**, v.1, n.4, p.258-261, 1996.

KLINK, U. **Melhoramento genético do sorgo para a produção de etanol**. 2010. Disponível em:
<http://www.cpact.embrapa.br/eventos/2010/simposio_agroenergia/palestras/11_quarta/Manha/Urubatan%20Klink>. Acesso em: 28 jun. 2018.

KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 24, n. 68, p. 223-253, 2010.

KÖPPEN, W. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra**. Mexico: Fondo de Cultura Econômica, 1948.478 p.

KUMAR, S.R; SHROTRIA, P.K; DESHMUKH, J.P. Characterizing Nutrient Management Effect on Yield of Sweet Sorghum Genotypes. **World Journal of Agricultural Sciences**, Pradesh, v. 4, n. 6, p. 787-789, 2008.

KUMAR, C.G.; FATIMA, A.; RAO, P.S.; REDDY, B.V.S.; RATHORE, A.; RAO, R.N.; KHALID, S.; KUMAR, A.A.; KAMAL, A. Characterization of Improved Sweet Sorghum Genotypes for Biochemical Parameters, Sugar Yield and Its Attributes at Different Phenological Stages. **Sugar Tech**, v.12, n.3-4, p.322-328, 2010.

LACERDA, J. J. J.; RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E.; HICKMANN, C.; CONCEIÇÃO, O. P. Adubação, produtividade e rentabilidade da rotação entre soja e milho em solo com fertilidade construída. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 9, p. 769-778, 2015.

LARA, J.P.; BORGES, I.D.; RIBEIRO, C.E.S.; FERNANDES, A.S.; SANTOS, F.C.; TEIXEIRA, E.C. Desempenho agrônômico de cultivares de sorgo sacarino em diferentes doses de nitrogênio e potássio. In: XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 2015, Natal. **Anais...Natal: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2015.

LEA, P.J.; BLACKWELL, R.D.; JOY, K.W. Ammonia assimilation in higher plants. In: K. Mengel, D.J. Pilbeam (Ed.). **Nitrogen metabolism of plants**. Oxford: Claredon, 1992. p. 153-186.

LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G. A career perspective on soil management in the Cerrado Region of Brazil. **Advances in Agronomy**, v.137, p.1-72, 2016.

LUPWAYI, N.Z.; CLAYTON, G.W.; HARKER, K.N.; TURKINGTON, T.K. & JOHNSTON, A.M. Impact of crop residue type on potassium release. **Better Crops**, v. 89, p.14-15, 2005.

MACEDO, I.C. Situação atual e perspectivas do etanol. **Estudos Avançados**, v.21, n.59, p. 157-165, 2007.

MACHADO, C.T.T.; MACHADO, A.T.; FURLANI, A.M.C. Variação intrapopulacional em milho para características relacionadas com a eficiência de absorção e utilização de fósforo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.3, n.1, p.77-91, 2004.

MAGALHÃES, P.C.; DURÃES, F.O.M.; RODRIGUES, J.A.S. **Fisiologia da planta de sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 4 p. (Comunicado Técnico 86).

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

MARAFON, A. C. **Análise quantitativa de crescimento em cana-de-açúcar: uma introdução ao procedimento prático**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2012. 31 p. (Documentos, 168).

MARCOCCIA, R. **A participação do etanol brasileiro em uma nova perspectiva na matriz energética mundial**. 2007. 95f. Dissertação (Mestrado em Energia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MARTINEZ, H.E.P.; CARVALHO, J.G.; SOUZA, R.B. de Diagnose foliar. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. (Ed.) **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação**. Viçosa: CFSEMG, 1999. p.143-168.

MARTINS, A.M.; PARRELLA, R.A.C.; LOPES, D.C.; SCHAFFERT, R.E.; PARRELLA, N.N.L.D.; NEVES, W.S.; SILVA, A.P.C.M. Período de utilização industrial de cultivares de sorgo sacarino visando a produção de etanol. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.16, n.2, p. 217-231, 2017.

MASSON, I. S.; COSTA, G.H.G.; ROVIERO, J.P.; FREITA, L.A.; MUTTON, M.A.; MUTTON, M.J.R. Produção de bioetanol a partir da fermentação de caldo de sorgo sacarino e cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v. 45, n. 9, p. 1695-1700, 2015.

MAZONI, D.F.; BURJAILI, I.T.; PAGOTTO, A.L. Adubação e nutrição com macronutrientes. In: TASSO JÚNIOR, L.C.; SILVA NETO, H.F.; NOGUEIRA, G.A.; MARQUES, M.O (Ed.). **Nutrição e adubação em cana-de-açúcar**. Sertãozinho: CANOESTE, 2013. p. 97-145.

MAY, A.; MENDES, S.M.; SILVA, D.D.; PARRELLA, R.A. C.; MIRANDA, R.A.; SILVA, A.F.; PACHECO, T.F.; AQUINO, L.A.; COTA, L.V.; COSTA, R.V.; KARAM, D.; PARRELLA, N.N.L.D.; SCHAFFERT, R.E. **Cultivo de sorgo sacarino em áreas de reforma de canaviais**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2013. 36p. (Circular Técnica, 186).

MELO, A. S.; SAMPAIO, Y. Uma nota sobre o impacto do preço do açúcar, do etanol e da gasolina na produção do setor sucroalcooleiro. **Revista Brasileira de Economia**, n. 70, v.1, p. 61-69, 2016.

MELO, T.S.; ALVES, M.E.S.; PALHARINI, W.G.; ALVES, J.S.R.; SILVA, M.S.; NEVES, R.P.; CONCENÇO, G.; LIMA FILHO, O.F. Comportamento fisiológico de plantas adultas de sorgo sacarino sob deficiências nutricionais. In: JORNADA DE INICIAÇÃO À PESQUISA DA EMBRAPA, 2014, Dourados. **Resumos...**Brasília, DF: Embrapa, 2014.

MEYER, J.H.; WOOD, R.A. The effects of soil fertility and nutrition on sugarcane quality: a review. **South African Sugar Technologists Association**, v.75, p. 242-247. 2001.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2017**. Disponível em: <www.anp.gov.br/wwwanp/?dw=68644>. Acesso em: 01 jul.2018.

MOLL, R.H.; KAMPRATH, E.J.; JACKSON, W.A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. **Agronomy Journal**, Madison, v.74, p.562-564, 1982.

MORELLI, J.; NELLI, E.; DEMATTÊ, J.L.I.; DALBEN, A.E. Efeito do gesso e do calcário nas propriedades químicas de solos arenosos álicos e na produção de cana-de-açúcar. **Revista STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.6, p. 24-31, 1987.

MOSALI, J.; ROGERS, J.; HUHNE, R.; BELLMER, D.; COOK, B. Effect of nitrogen fertilization timing on juice and bagasse quality of sweet sorghum for biofuel production. In: 19TH WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, SOIL SOLUTIONS FOR A CHANGING WORLD, 2010, Brisbane. **Anais...** Brisbane, 2010.

MURSYID, E. S.; SALENGKE, M.R.; ROSMAENI, S. Agronomic Characters on Three Varieties of Sorghum with Differences of NPK Fertilizer Source and Harvest Time. **International Journal of Emerging Trends in Science and Technology**, v.4, n.6, p. 5261-5265, 2017.

NAGAI, M.A. **Produtividade de biomassa de sorgo sacarino sem irrigação na Zona da Mata Norte de Pernambuco**. 2010. 43f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

NAKÍCENOVIC, N; GRUBLER, A & MACDONALD, A. Global energy perspectives. In: Doctor, R. D. **Environmental Progress & Sustainable Energy**. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 250p.

NEXSTEPPE SEMENTES DO BRASIL. **Sorgo Sacarino híbrido Malibu 5010**. Departamento Assistência técnica Nexsteppe, 2018. Disponível em:<http://www.assocana.com.br/palestras/9_Enc._Varied_Palestra03.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2018.

NORTON, R. M. Nutrient Use Efficiency and Effectiveness in Australia: Assessing Agronomic and Environmental Benefit. **International Plant Nutrition Institute Issue Review**, n.1, p. 1-9, 2017.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.

OLIVEIRA, M.E.D.; MORAES, S.O. Modeling approaches for agricultural N₂O fluxes from large scale areas: A case for sugarcane crops in the state of São Paulo - Brazil. **Agricultural Systems**, n. 150, p. 1-11, 2017.

OLIVEIRA, M. S. **Tolerância de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) à toxidez por alumínio em solução**. 2012. 112f. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente), Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2012.

OLIVEIRA, M.S.; PARRELLA, R.A.C.; SOUZA, V.F.; SCHAFFERT, S.M.M.; RIBEIRO, P.C.O.; MOURÃO, C.S.; MACHADO, P.H.B.; ANDRADE, L.C.; FERREIRA, A.G. Desempenho de cultivares de sorgo sacarino em dois níveis de saturação por alumínio visando a produção de etanol. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MELHORAMENTO DE PLANTAS, 7, 2013, Uberlândia. **Anais...** Variedade melhorada: a força da nossa agricultura, Uberlândia, 2013.

OLIVEIRA, S.A. Análise foliar. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. (Ed.) **Cerrado correção do solo e adubação**. Brasília: EMBRAPA, 2004. p.245-256.

ORLANDO FILHO, J. Calagem e adubação da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G.M.S.; OLIVEIRA, E.A.M. (Ed.). **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ/USP, 1994. p. 133-146.

PACHECO, T. F. **Produção de Etanol: Primeira ou Segunda Geração**. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2011. 6 p. (Circular Técnica, 4).

PACHECO, T.F. Tecnologia Industrial. In: MAY, A.; DURÃES, F.O.M.; PEREIRA FILHO, I.A.; SCHAFFERT, R.E.; PARRELLA, R.A.C. (Ed.). **Sistema Embrapa de produção agroindustrial de sorgo sacarino para bioetanol: Sistema BRS1G – Tecnologia Qualidade Embrapa**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. p. 92-106. (Documentos, 139).

PARRELLA, R.A.C.; RODRIGUES, J. A. S.; TARDIN, F. D.; DAMASCENO, C. M. B.; SCHAFFERT, R. E. **Desenvolvimento de híbridos de sorgo sensíveis ao fotoperíodo visando alta produtividade de biomassa**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. 25 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 28).

PARRELLA, R.A.C. Sorgo sacarino: desenvolvimento de tecnologia agrônômica. **Agroenergia em Revista**, Brasília, ano 2, n. 3, p. 7, 2011.

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

PERES, J.R.R.; FREITAS JUNIOR, E.; GAZZONI, D.L. Biocombustíveis: uma oportunidade para o agronegócio brasileiro. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, n.5, p.31-41, jan./fev./mar. 2005.

PINHO, R. G. V.; FIORINI, I. V. A.; SANTOS, A O. Botânica. In: BOREM, A.; PIMENTAL, L. PARRELLA, R. **Sorgo do plantio à colheita**. Viçosa: UFV, 2014. p. 37-57.

PINTO, N.F.J.A.; FERREIRA, A.S.; CASELA, C.R. Ergot (*Claviceps africana*) ou doença açucarada do sorgo. Sete Lagoas, MG: EMBRAPA-CNPMS, 1997. 24p. (**Circular Técnica, 23**).

PIVETTA, R.S. **Acúmulo de matéria seca e nutrientes de híbridos de sorgo sacarino em condições de safrinha em Selvíria-MS**. 52f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.

PROCHNOW, L.I.; CUNHA, J.F.; JORGETTO, L.O.; CANTARELLA, H.; LAVORENTI, E.L.; FERNANDES, D.M. **Levantamento da Fertilidade do Solo do Estado de São Paulo**. Piracicaba: IPNI, 2018. 8 p. (Informações Agronômicas 161).

QUARESMA, C.C.; PEREZ FILHO, A. Relações entre uso e ocupação das terras, ampliação de áreas e redução da biodiversidade do cerrado em solos arenosos do estado de São Paulo. In: VI SEMINÁRIO LATINO AMERICANO DE GEOGRAFIA FÍSICA, 2010, Coimbra. **Anais...**Coimbra, 2010.

QUEIRÓZ, M.V.B.M. **Balço energético da produção de sorgo sacarino em cultivo irrigado e sequeiro**. 2014. 49 f. (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2014.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agronômico, 1997. (IAC. Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285 p.

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

RAMOS, S.B. **Dose, parcelamento e modo de aplicação de nitrogênio em atributos nutricionais, agronômicos e tecnológicos de cultivares de sorgo sacarino**. 2014. 153 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, 2014.

RAO, R.S. **Influence of nitrogen, potassium levels and stages of harvest on sweet sorghum**. 2013. 119 f. Tese (Doutorado em Filosofia). Acharya N. G. Ranga Agricultural University, Hyderabad, 2013.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2018. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 03 mar. 2018.

REETZ, H.F. **Fertilizantes e o seu uso eficiente**. Tradução Alfredo Scheid Lopes. São Paulo: ANDA, 2017. 178 p.

REGASSA, T. H.; WORTMANN, C. S. Sweet sorghum as a bioenergy crop: Literature review. **Biomass and Bioenergy**, v. 64, p. 348-355, 2014.

REIS, R.M. **Produtividade e manejo de plantas daninhas no sorgo sacarino cultivado em diferentes arranjos de plantas**. 2014. 56f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

REIS, S.R.; SILVA E.A. Motores Elétricos Flex a Etanol: uma nova Era no Setor Automotivo Mundial. **Revista Ciência Exatas Tecnologia**, v. 12, n. 12, p. 45-48, 2017.

RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. **World Fuel Ethanol Production**. 2017. Disponível em: <<http://www.ethanolrfa.org/resources/industry/statistics/#1454098996479-8715d404-e546>>. Acesso em: 8 de junho de 2018.

RESENDE, A.V.; FONTOURA, S. M.; BORGUI, E.; SANTOS, F.C.; KAPPES, C; MOREIRA, S.G.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; BORIN, A.L.D.C. **Solos de fertilidade construída: características, funcionamento e manejo**. Piracicaba: IPNI, 2016. 17 p. (Informações Agronômicas, 156).

REZENDE, M. L.; RICHARDSON, J. W. Risk analysis of using sweet sorghum for ethanol production in southeastern Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 97, p. 100-107, 2017.

ROBERTO, C. Dobradinha com o sorgo. **Revista Cana Mix**, n.62, p. 32-42, 2013.

ROBERTS, T.L. Improving Nutrient Use Efficiency. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 32, 177-182, p. 177-182, 2008.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: UNESP, 1995. 100 p.

RODRIGUES, R. **Agroenergia: um novo paradigma agrícola mundial**. 2007. Disponível em:<http://www.iea.usp.br/midiateca/apresentacao/crmg3_robotorodrigues.pdf/at_download/file> Acesso em: 05 jun. 2018.

ROSOLEM, C.A.; MALAVOLTA, E. Acumulação de matéria seca e macronutrientes pelo sorgo sacarino. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v.38, n.1, p.223-242, 1981.

ROSOLEM, C.A.; MALAVOLTA, E. Estudo preliminar sobre a diagnose foliar do sorgo sacarino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 17, p.33-38, 1982.

SÁ, J. C. M.; SEGUY, L.; SÁ, M. F. M.; FERREIRA, A. O.; BRIEDIS, C.; SANTOS, J. B.; CANALLI, L. Gestão da matéria orgânica e da fertilidade do solo visando sistemas sustentáveis de produção. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: Culturas**. Piracicaba: IPNI, 2010, p. 383-420.

SANTANA, C.A. **Inibidor de uréase (NBPT) e a eficiência da ureia aplicada em dose única ou parcelada na cultura do sorgo sacarino**. 2018. 42f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Agrônoma). Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2018.

SANTOS, F.C.; FILHO, M.R.A.; RESENDE, A.V.; OLIVEIRA, A.C. **Efeito da adubação de cobertura com nitrogênio e potássio na cultura do sorgo biomassa**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2013. 36 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 73).

SANTOS, R.F.; PLACIDO, H.F.; GARCIA, E.B.; CANTÚ, C.; ALBRECHT, A.J.; FRIGO, K.D.A. Sorgo sacarino na produção de agroenergia. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v.4, p.1- 2, 2015.

SCHAFFERT, R. E.; PARRELLA, R. A. C. Planejamento industrial. In: MAY, A.; DURÃES, F. O. M.; PEREIRA FILHO, I. A.; SCHAFFERT, R. E.; PARRELLA, R. A.C. (Ed.). **Sistema Embrapa de produção agroindustrial de sorgo sacarino para bioetanol: Sistema BRS1G-Tecnologia Qualidade Embrapa**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. p. 85-92. (Documentos, 139).

SENA, F.M.; MOURA, S.M.; SANTOS, C.V.; ABREU, A.L.; ANDRADE, L.C.; FERREIRA, A.G.; SOUZA, V.F.; PARRELLA, R.A.C.; MENEZES, C.B.; SCHAFFERT, R.E. Distribuição e acumulação de açúcares nos entrenós de dois genótipos de sorgo sacarino sensíveis ao fotoperiodismo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MELHORAMENTO DE PLANTAS, 7, 2013, Uberlândia. **Anais...Variedade melhorada: a força da nossa agricultura**, Uberlândia, 2013.

SILVA, E.S.; COSTA, J.H.S.; MEDEIROS, D.A.; CÂMARA, T.M.M. Desempenho de genótipos de sorgo sacarino cultivos na região canavieira de Alagoas. In: X WORKSHOP AGROENERGIA: MATÉRIAS-PRIMAS, 2016, Ribeirão Preto. **Anais... Ribeirão Preto**, 2016.

SILVEIRA, J.A.G. **Aspectos bioquímicos e fisiológicos da relação K/N em cana-de-açúcar (*Saccharum sp*) cv. NA-579 cultivada em solução nutritiva**. 1980. 127f. Tese (Doutorado), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1980.

SNYDER, C.S.; T.W. BRUULSEMA. Nutrient Use Efficiency and Effectiveness in North America: Indices of Agronomic and Environmental Benefit. **International Plant Nutrition Institute**, p.1-4, 2007.

SOARES, E.R.; COUTINHO, E.L.M.; RAMOS, S.B.; SILVA, M.S; BARBOSA, J.C. Acúmulo de matéria seca e macronutrientes por cultivares de sorgo sacarino. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 35, n. 6, p. 3015-3030, nov./dez., 2014.

SOARES, M. R.; CASAGRANDE, J. C.; NICOLOSO, R. S. Uso da vinhaça da cana-de-açúcar como fertilizante: eficiência agrônômica e impactos ambientais. In: PALHARES, J. C. P.; GEBLER, L. (Ed.). **Gestão ambiental na agropecuária**. Brasília: EMBRAPA, cap. 4. p. 145-198, 2014.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2.ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416 p.

TEIXEIRA, C. G.; JARDINE, J. G.; NICOLELLA, G.; ZARONI, M. H. Influência da época de corte sobre o teor de açúcares de colmos de sorgo sacarino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 9, p. 1601-1606, 1999.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G. Dinâmica do potássio nos resíduos vegetais de plantas de cobertura no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1609-1618, 2008.

UNICA - UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **UNICA celebra acordo para o clima na COP21**. 2015. Disponível em:

<<http://www.unica.com.br/noticia/22757742920320153336/unica-celebra-acordo-para-o-clima-na-cop21/>> Acesso em: 30 jun. 2018.

URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; BOODEY, R.M. Produção de biocombustíveis: a questão do balanço energético. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, n.5, p.31-41, jan./fev./mar. 2005.

VEDANA, J.C. **A realidade do carro a etanol e o puro elétrico**.2018. Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/combate/carro-eletrico/realidade-carro-etanol-puro-eletrico-250118/>>. Acesso em: 02 jun. 2018.

VERMERRIS, W. Survey of genomics approaches to improve bioenergy traits in maize, sorghum and sugarcane. **Journal of Integrative Plant Biology**, West Sussex, v.53, n.2, p.105-119, 2011.

VIEIRA, R. C. B.; FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C.; MORAES, R. P.; CARNIEL, E. Potassium fertilization for long term no-till crop rotation in the Central-Southern region of Paraná, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1-16, 2016.

VILELA, E. F.; BÜLL, L. T. Avaliação do crescimento de plantas de milho em função de doses de potássio e estresse hídrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 281-289, 1999.

WAMSER, A.F.; MUNDSTOCK, C.M. Adubação nitrogenada em estádios fenológicos em cevada, cultivar MN 698. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 4, p.942-948, jul/ago. 2007.

WANG, J.C.; DAI, L.; TIAN, Y.S.; QIN, S.P. Analysis of the development status and trends of biomass energy industry in China. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**. v. 23, p. 276-282, 2007.

WIEDENFELD, R. P. Nutrient requirements and use efficiency by sweet sorghum. **Energy in Agriculture**, v.3, p. 49-59, 1984.

WICKLIN, R. **Log transformations: How to handle negative data values?** .2011. Disponível em: <<https://blogs.sas.com/content/iml/2011/04/27/log-transformations-how-to-handle-negative-data-values.html>> Acesso em: 08 abr. 2018.

WU, X.R.; STAGGENBORG, S.; PROPHETER, J.L.; ROONEY, W.L.; YU, J.M.; WANG, H. Features of sweet sorghum juice and their performance in ethanol fermentation. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v.31, n.1, p. 164-170, 2010.

YAMADA T. **Melhoria na eficiência da adubação aproveitando as interações entre os nutrientes**. Piracicaba: POTAFOS, 2002. 5 p. (Informações Agronômicas, 100).

YANG, X.et al. Technical Feasibility and Comprehensive Sustainability Assessment of Sweet Sorghum for Bioethanol Production in China. **Sustainability**, v.10, n.2, 2018.

7. ANEXOS

Anexo I: Histórico experimental



Figura 24. Preparo do solo e abertura dos sulcos de plantio.



Figura 25. Estaqueamento das parcelas experimentais.



Figura 26. Distribuição dos fertilizantes de acordo com as doses testadas, calculadas para aplicação em 6m lineares.



Figura 27. Capina seletiva e vista experimental aos 25DAE.



Figura 28. Vista experimental aos 60DAE.

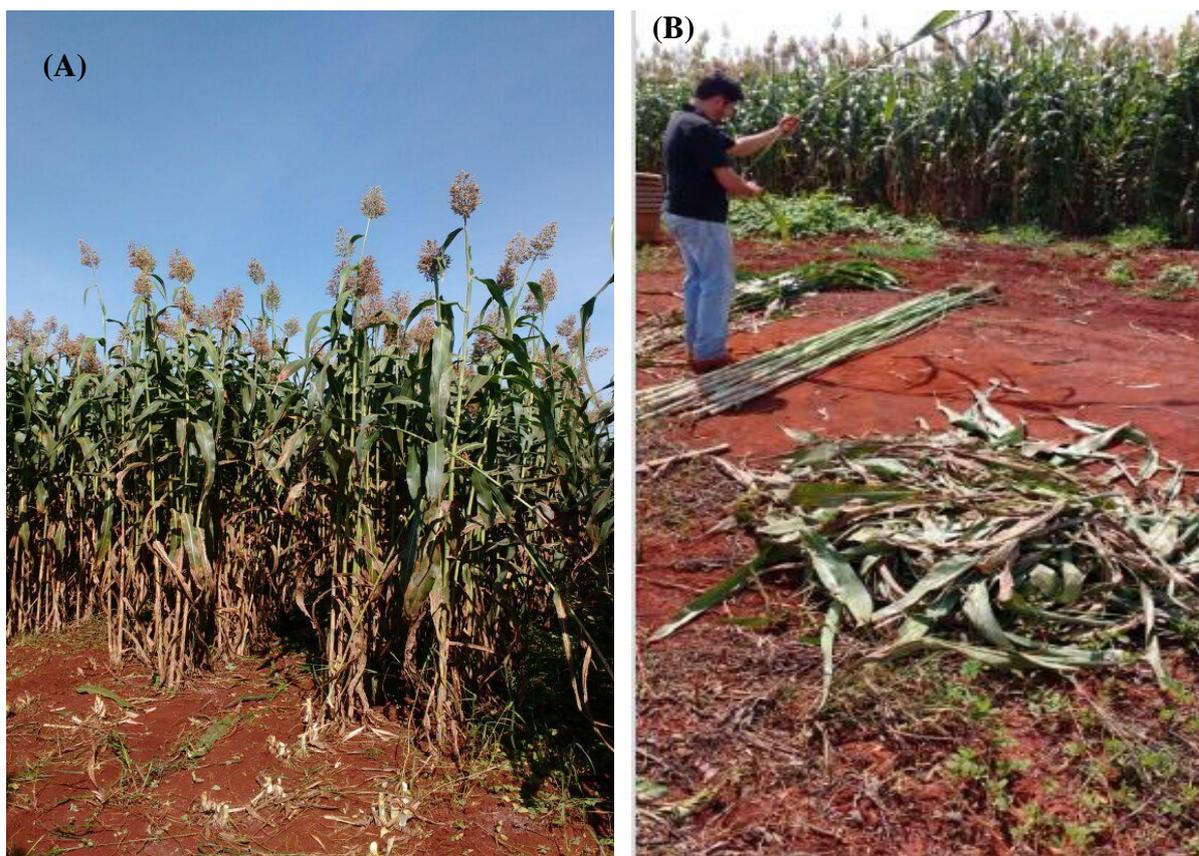


Figura 29. Corte aleatório de plantas contidas em de 6 m por parcela (A) e despalhamento das plantas e seleção de plantas (B) para determinações biométricas, nutricionais e de rendimento.



Figura 30. Processamento das amostras em máquina forrageira para determinação de matéria seca, umidade e teores nutricionais da parte aérea.

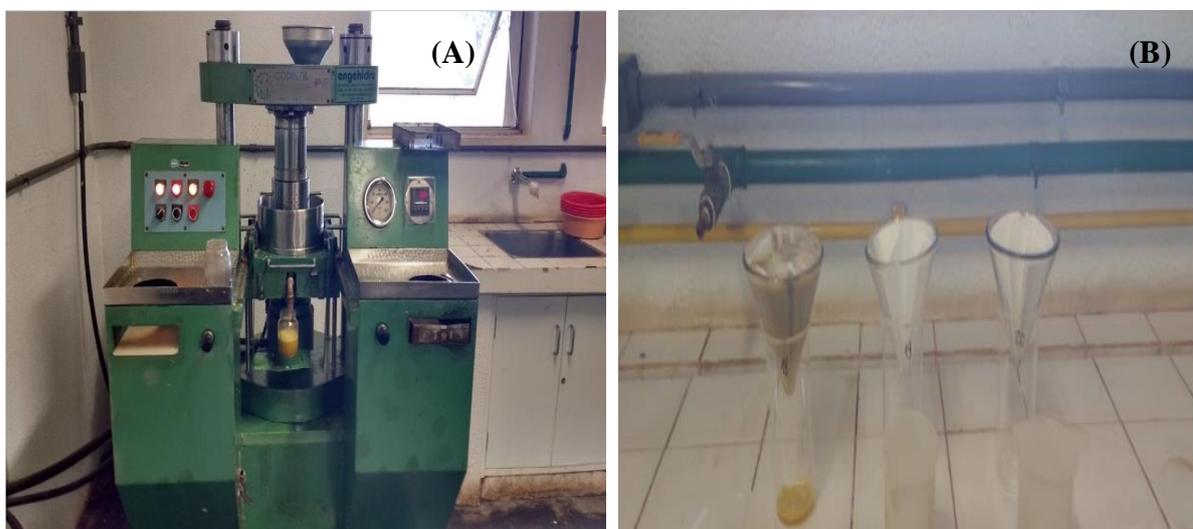


Figura 31. Prensagem hidráulica para extração do caldo (A); filtração e clarificação do caldo para determinação dos caracteres tecnológicos (B).



Figura 32. Leitura do °Brix em refratômetro de bancada (A); Leitura da Pol em sacarímetro digital (B).



Figura 33. Determinação do PBU (Peso do Bolo Úmido) (A); determinação do PBS (Peso do Bolo Seco) (B), para cálculo do teor de Fibra.

Anexo II: Memórias de cálculo

DOSE RECOMENDADA (1,0 DR): a partir das recomendações dos Boletins 100 (Raij et al., 1997) e 200 do IAC (Bolonhezi et al., 2014).

Plantio

N: produtividade esperada (50 t ha⁻¹): 20 kg ha⁻¹ de N

P: teor médio (37,5 mg dm⁻³): 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅

K: teor alto (3,6 mmol_c dm⁻³): 120 kg ha⁻¹ de K₂O (parcelamento: 50 kg ha⁻¹ de K₂O no plantio)

B: teor baixo (0,07 mg dm⁻³): 2 kg ha⁻¹ de B

Cobertura

90 kg ha⁻¹ de N e 70 kg ha⁻¹ (classe de média resposta esperada, solo em pousio por um ano):
20 kg ha⁻¹ de N; 50 kg ha⁻¹ de K₂O aos 20 dias após a emergência (DAE).

Trat.	Área	Adubação de plantio				Adubação de cobertura	
		kg				N	K ₂ O
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	B		
100% DR	10.000 m ²	20	80	50	2	90	70
100% DR	227,5 m ²	0,46	1,82	1,14	0,05	2,05	1,59

Adubação de Plantio				
Dose (kg)	Fonte		% Adubo	Qtde. adubação (kg)
0,46	N	Nitrato de amônio	30% de N	0,45
1,82	P	Superfosfato Simples	3 % de N; 17 % P ₂ O ₅ ; 11% S	10,71
1,14	K	Cloreto de Potássio	60 % de K ₂ O	1,90
0,05	B	Ácido Bórico	17 % de B	0,27
Total de Nutrientes				13,32
227,5 m ² = 350 m lineares (espaçamento 1,00 x 0,50 x 0,50 m) → kg m ⁻¹				0,038
g m ⁻¹				38,044
gramas em 7 m lineares				266,31
Adubação de Cobertura				
Dose (kg)	Fonte		% Adubo	Qtde. adubo (kg)
2,05	N	Nitrato de amônio	30% de N	6,83
1,59	K	Cloreto de Potássio	60 % de K ₂ O	2,65
Total de Nutrientes				9,48
227,5 m ² = 350 m lineares (espaçamento 1,00 x 0,50 x 0,50 m) → kg m ⁻¹				0,027
g m ⁻¹				27,083
gramas em 7 m lineares				189,58