

LUIZ HENRIQUE SILVEIRA

ADUBAÇÃO NITROGENADA EM SOQUEIRA DA CANA-DE-AÇÚCAR E
ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE POR ANÁLISE DE IMAGEM
MULTIESPECTRAL

Dissertação apresentada à Universidade Federal de
Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-
graduação em Agronomia – Mestrado, área de concentração
em Fitotecnia, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Dr. Hamilton Seron Pereira

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS – BRASIL
2020

LUIZ HENRIQUE SILVEIRA

ADUBAÇÃO NITROGENADA EM SOQUEIRA DA CANA-DE-AÇÚCAR E
ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE POR ANÁLISE DE IMAGEM
MULTIESPECTRAL

Dissertação apresentada à Universidade Federal de
Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-
graduação em Agronomia – Mestrado, área de concentração
em Fitotecnia, para obtenção do título de “Mestre”.

Prof. Dr. Mauricio Cunha Escarpinati

UFU

Prof. Dr. Sandro Manuel Carmelino Hurtado

UFU

Dr. Gustavo Alves Santos

KP Consultoria

Prof. Dr. Hamilton Seron Pereira
ICIAG-UFU
(Orientador)

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS – BRASIL
2020

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

| | |
|--------------|--|
| S587 2020 | <p>Silveira, Luiz Henrique, 1989- Adubação nitrogenada em soqueira da cana-de-açúcar e estimativa de produtividade por análise de imagem multiespectral [recurso eletrônico] / Luiz Henrique Silveira. - 2020.</p> <p>Orientador: Hamilton Seron Pereira. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Agronomia. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.311 Inclui bibliografia.</p> <p>1. Agronomia. I. Pereira, Hamilton Seron, 1968-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Agronomia. III. Título.</p> <p>CDU: 631</p> |
|--------------|--|

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Agronomia
Rodovia BR 050, Km 78, Bloco 1CCG, Sala 206 - Bairro Glória, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 2512-6715/6716 - www.ppga.iciag.ufu.br - posagro@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

| | | | | | |
|-------------------------------|---|-----------------|-------|-----------------------|-------|
| Programa de Pós-Graduação em: | Agronomia | | | | |
| Defesa de: | Dissertação de Mestrado Acadêmico, 015/2020 PPGAGRO | | | | |
| Data: | Vinte e oito de fevereiro de dois mil e vinte | Hora de início: | 08:00 | Hora de encerramento: | 13:00 |
| Matrícula do Discente: | 11812AGR016 | | | | |
| Nome do Discente: | Luiz Henrique Silveira | | | | |
| Título do Trabalho: | Adubação nitrogenada em soqueira de cana-de-açúcar e estimativa de produtividade por análise de imagem multiespectral | | | | |
| Área de concentração: | Solos | | | | |
| Linha de pesquisa: | Uso e Recuperação de Solos e Resíduos na Agricultura | | | | |

Reuniu-se na sala 103 do bloco 1BCG, Campus Glória, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, assim composta: Professores Doutores: Sandro Manuel Carmelino Hurtado - UFU; Maurício Cunha Escarpinati - UFU; Gustavo Alves Santos - KP Consultoria; Hamilton Seron Pereira - UFU orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr. Hamilton Seron Pereira, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Hamilton Seron Pereira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/02/2020, às 12:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mauricio Cunha Escarpinati, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/02/2020, às 13:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sandro Manuel Carmelino Hurtado, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/02/2020, às 13:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Alves Santos, Usuário Externo**, em 28/02/2020, às 13:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1841685** e o código CRC **A66A801F**.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela sua infinita bondade, possibilitando chegar até aqui, correndo atrás dos meus sonhos com saúde e cercado de pessoas do bem.

A minha filha Ana Luiza, por ser fonte de amor e ensinamentos diários. Te amo!

Aos meus pais, Daniel e Zilmar, por terem me apoiado desde o início de minha jornada, pelos conselhos e pelo enorme esforço para que conseguisse atingir nossos objetivos. Muito obrigado!

Ao meu irmão Philipe, pela amizade, apoio e por mostrar através do seu exemplo o poder de batalhar pelos nossos sonhos.

A minha esposa Franciyara pelo companheirismo ao longo da nossa caminhada.

Aos meus sogros Francisco e Mara, pelo valioso auxílio durante esta jornada.

Ao meu orientador Dr. Hamilton Seron Pereira pela amizade, pelos ensinamentos passados durante os anos de convivência, pela oportunidade de entrar no Grupo de Pesquisa Silício na Agricultura e também pela ajuda à minha família. Muito obrigado!

A toda equipe KP Consultoria, Dr. Gustavo Alves Santos, pela amizade e pelos valiosos ensinamentos proporcionados pelo convívio quase diário. A Msc. Camila de Andrade Carvalho Gualberto pela amizade, pelos conselhos e auxílio na confecção deste trabalho e também aos estagiários Caio, Felype e Gregório pela amizade e auxílio na condução deste trabalho.

Ao professor Dr. Gaspar Henrique Korndorfer e sua esposa Clotilde Korndorfer pelos conselhos e auxílio à minha família.

Ao professor Maurício Cunha Escarpinati pelo auxílio na execução deste trabalho.

Aos amigos do Grupo de Pesquisa Silício na Agricultura: Artur Mesquita, Bárbara Campos, Bruno Guimarães, Gabriel Barcelos, Luiz Felipe pela amizade e auxílio na execução deste trabalho.

A empresa Sensix Agro, em especial Carlos Ribeiro, Thomaz Lemos, Augusto e Laísa pelo suporte na execução deste trabalho.

As equipes das usinas COFCO *International* (Sebastianópolis/SP), Usina Açucareira Guaíra (Guaíra/SP) e Usina São Francisco (Quirinópolis/GO), pelo apoio na instalação e avaliações nos experimentos.

Aos técnicos dos laboratórios de fertilizantes, e de análise de solo da Universidade Federal de Uberlândia pelo auxílio na execução das análises.

Muito obrigado!!!

Sumário

| | |
|--|-----------|
| Sumário | 5 |
| GENERAL ABSTRACT..... | 9 |
| CAPÍTULO I | 10 |
| 1 INTRODUÇÃO GERAL..... | 10 |
| 2 REFERÊNCIAS | 12 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 13 |
| 1 Cana-de-açúcar | 13 |
| 2 Crescimento da cana-de-açúcar | 14 |
| 3 Nitrogênio no ambiente e sua importância | 17 |
| 4 Adubação nitrogenada na soqueira da cana-de-açúcar | 19 |
| 5 Fertilizantes líquidos e suas características | 21 |
| 6 Sistemas de monitoramento agrícola no Brasil | 22 |
| 7 Agricultura 4.0..... | 23 |
| 8 Produtividade dos cultivos | 24 |
| 9 Sensoriamento remoto da vegetação | 24 |
| 10 Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP)..... | 25 |
| 11 Processamento digital de imagens | 26 |
| 12 Índices de vegetação | 26 |
| 13 Descritores de imagens por textura..... | 27 |
| REFERÊNCIAS | 29 |
| CAPÍTULO II..... | 39 |
| RESUMO..... | 39 |
| 1 INTRODUÇÃO | 41 |
| 4 MATERIAL E MÉTODOS..... | 43 |
| 14 Descrição das fontes | 46 |
| 15 Avaliações..... | 46 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 52 |
| 16 Perfílos por metro | 52 |
| 17 Teores de N e Ca..... | 56 |
| 18 Produtividades de colmos e açúcar | 63 |
| 19 Qualidade matéria-prima | 74 |
| 20 Índice de eficiência agronômica (IEA)..... | 78 |
| 6 CONCLUSÕES | 83 |
| REFERÊNCIAS | 84 |
| CAPÍTULO III | 88 |

| | |
|---|------------|
| RESUMO..... | 88 |
| 1 INTRODUÇÃO | 90 |
| 1 MATERIAL E MÉTODOS..... | 91 |
| 21 Áreas experimentais..... | 91 |
| 22 Delineamento experimental | 92 |
| 23 Instalação do experimento | 93 |
| 24 Obtenção e processamento das imagens | 93 |
| 25 Obtenção do peso das parcelas experimentais | 97 |
| 26 Momentos invariantes de Hu | 98 |
| 27 Análises Weka | 99 |
| 28 Índices de vegetação | 99 |
| 1.1.1 Índice de folhas verdes (GLI)..... | 99 |
| 1.1.2 Índice de vegetação com diferença normalizada no verde (GNDVI) | 100 |
| 1.1.3 IV Ajustado ao Solo Otimizado para Verde (GOSAVI) | 100 |
| 1.1.4 Índice de vegetação com proporção verde (GRVI)..... | 100 |
| 1.1.5 Índice da diferença normalizada na banda vermelho (NDRE)..... | 100 |
| 1.1.6 Índice de Vegetação por Diferenças Normalizadas (NDVI)..... | 101 |
| 1.1.7 Índice de Vegetação por Diferenças Renormalizadas (RDVI)..... | 101 |
| 29 Fluxograma das operações..... | 102 |
| 2 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 103 |
| 3 CONCLUSÃO | 106 |
| REFERÊNCIAS | 107 |

Lista de abreviações

N – Nitrogênio

Ca – Cálcio

K – Potássio

NH_4^+ – Nitrogênio na forma de Amônio

NO_3^- – Nitrogênio na forma de Nitrato

^{15}N – Sulfato de Amônio

kg – kilos

ha – hectare

N_2 – Nitrogênio na forma gasosa

NO_2 – Nitrogênio na forma de óxido nitroso

H^+ – Hidrogênio na forma iônica

C:N – Relação entre Carbono e Nitrogênio no solo

t – Tonelada

TCH – Tonelada de Colmos por Hectare

NH_3 – Nitrogênio na forma de Amônia

L – Litro

NH_2 – Nitrogênio na forma de Amida

REM – Radiação Eletromagnética

ARP – Aeronave Remotamente Tripulada

RESUMO GERAL

SILVEIRA, Luiz Henrique. **Estimativa de produtividade da cana-de-açúcar por imagens multiespectrais com variações de fontes de nitrogênio**. 2020. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

O planejamento de uma usina de cana-de-açúcar tem como principal variável a produção da cultura, que em conjunto com a área plantada permite estimar a produtividade. Dentre os fatores que compõe a produtividade, a adubação possui importante papel, sendo que a nitrogenada é considerada um componente essencial, uma vez que as recomendações são realizadas com base na produtividade esperada. Nesse sentido, objetivou-se com este estudo realizar a estimativa de produtividade da cana-de-açúcar por imagens multiespectrais em experimentos com variações de fontes líquidas de nitrogênio (N). Foram instalados três experimentos em áreas das usinas de cana-de-açúcar, COFCO *International* (Sebastianópolis/SP), Usina Açucareira Guaíra (Guaíra/SP) e Usina São Francisco (Quirinópolis/GO). Nos três experimentos foram testadas cinco fontes de N, sendo elas: Ucan (23% N + 4% Ca), Uran (32% N), Nitran (20% N), 20-00-00 + 4% Mg + 1% de Ca e Ureia líquida (20% N), na dose de 100 kg ha⁻¹ de N. Os fertilizantes Ucan e Uran também foram testados nas doses de 33, 66 e 133 kg ha⁻¹ de N, além do tratamento testemunha, sem N. As parcelas experimentais foram constituídas por 5 linhas de cana-de-açúcar com 10 m de comprimento e espaçadas 1,5 m entre si. A aplicação dos fertilizantes foi realizada com pulverizador costal e cilindro pressurizado à CO₂, sendo aplicação direcionada ao solo, na linha de brotação da soqueira. Cerca de 90 dias após a aplicação, avaliou-se o número de perfilho por metro, e amostras de folha foram coletadas para a determinação dos teores de cálcio (Ca) e N, bem como realizou-se voo com aeronave remotamente tripulada (ARP – Sensix SX2) embarcada com sensor multiespectral (Micasense). Aproximadamente 250 dias após aplicação, realizou-se a colheita das parcelas experimentais, afim de determinar a produtividade de colmos (TCH) para avaliar as fontes e modelar os dados. Também foram realizadas análises de qualidade da matéria-prima, determinando o pol (%) da cana-de-açúcar e o açúcar total recuperável (kg t⁻¹), sendo este último utilizado para determinar a produtividade de açúcar por hectare (TAH). Com os resultados de TCH e TAH, realizou-se o cálculo do índice de eficiência agrônoma (IEA) das fontes Nitran, 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca e Ureia líquida, sendo observado que a fonte Ureia líquida apresentou o menor índice em todos experimentos, independente da variável analisada (TCH e TAH). De modo geral, fontes de N líquidas testadas resultaram em índices de eficiência agrônoma superior à fontes Uran aplicada na dose de 100 kg ha⁻¹ de N. A modelagem da estimativa apresentou correlação de 60% (R²).

Palavras-chave: adubação líquida; índice de eficiência agrônoma; *Saccharum officinarum*;

GENERAL ABSTRACT

SILVEIRA, LUIZ HENRIQUE. **Sugarcane productivity estimation by multispectral images with variations of nitrogen sources.** Uberlândia: UFU, 2020. 100p. Dissertation (Master in Agronomy/Soils - Federal University of Uberlândia).

The planning of a sugarcane plant has as main variable the production of the crop, which together with the planted area allows estimate productivity. Among the factors that make up productivity, fertilization plays an important role, and nitrogen is considered an essential component, recommendations are made based on expected productivity. In this sense, the objective of this study was to estimate sugarcane productivity by multispectral images in experiments with variations in liquid nitrogen (N) sources. Three experiments were installed in the areas of sugarcane mills, COFCO International (Sebastianópolis/SP), Guaíra Sugar Mill (Guaíra/SP) and São Francisco Power Plant (Quirinópolis/GO). In three experiments were tested five sources of N, being they: Ucan (23% N + 4% Ca), Uran (32% N), Nitran (20% N) 20-00-00 + 4% Mg + 1% of Ca and liquid urea (20% N), at the dose of 100 kg ha⁻¹ N. The fertilizers Ucan and Uran were also tested at doses of 33, 66 and 133 kg ha⁻¹ of N, beyond the control treatment without N. The experimental plots were composed by 5 rows of sugar cane with 10 m in length and spaced 1.5 m apart from each other. The application of fertilizers was performed with costal sprayer pressurized cylinder and to CO₂, being driven application to soil, on the line of the stump sprouting. Approximately 90 days after the application, we evaluated the number of tiller per meter and leaf samples were collected for the determination of the levels of calcium (Ca) and N, as well as flight was performed with manned aircraft remotely (ARP - Sensix SX2) loaded with multiespectral (Micasense sensor). Approximately 250 days after application, the harvest of the experimental plots, in order to determine the productivity of stalks (TCH) to evaluate the sources and model data. Were also carried out analyzes of raw material quality, determining the inch (%) of sugar cane and the total recoverable sugar (kg t⁻¹), this latter being used to determine the productivity of sugar per hectare (TAH). With the results of TCH and TAH, the agronomic efficiency index (AEI) of nitran sources was calculated, 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca and liquid Urea it was observed that the liquid Urea source presented the lowest index in all experiments, regardless of the variable analyzed (TCH and TAH). In general, liquid N sources tested resulted in agronomic efficiency indices higher than Uran sources applied in the dose of 100 kg ha⁻¹ of N. The modeling of the estimate presented correlation of 60% (R²).

Keywords: liquid fertilization, agronomic efficiency index, *Saccharum officinarum*;

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO GERAL

A cana-de-açúcar é vista como uma grande alternativa ao setor de biocombustíveis graças ao seu enorme potencial na produção de etanol e seus subprodutos. Aliada à produção de etanol e açúcar, as usinas buscam aumentar a eficácia na geração de energia elétrica, podendo ofertar energia às companhias elétricas, reduzindo seus custos de produção e por consequência elevando a sustentabilidade do setor. Diferente da indústria sucroenergética dos demais países produtores, as indústrias brasileiras operam em um cenário de sustentabilidade, correspondendo às preocupações relativas ao meio ambiente e aos efeitos prejudiciais na utilização de combustíveis fósseis. A produção de etanol brasileiro, oferta ao mercado um combustível renovável, que não afeta a camada de ozônio e é produzido de fonte renovável. Desta forma, o Brasil que é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com uma produção estimada para a safra 2019/2020 de 622,3 milhões de toneladas em uma área colhida de 8,38 milhões de hectares (CONAB, 2019), se torna extremamente competitivo na comercialização de etanol.

O planejamento das usinas de cana-de-açúcar é dependente da produtividade das áreas que fornecerão matéria prima para a unidade industrial. Com o conhecimento da produtividade de todas as áreas, é possível estimar sua produção. Esta é uma informação gerencial de suma importância, uma vez que se tem o cenário de todo material que será processado é possível planejar tanto a indústria, quanto a parte de campo (implementos, mão de obra, aquisição de defensivos e fertilizantes, dentre outros). Diversos fatores estabelecem a produtividade, tais quais ambientes de produção, variedade plantada, manejo adubação, ocorrência de pragas e doenças e clima.

Atualmente, o modelo com maior utilização pelas usinas de cana-de-açúcar é a estimativa por especialistas. De modo geral, consiste na avaliação dos canaviais por técnicos municiados com informações do ambiente de produção, análise de solo, variedade plantada, desenvolvimento da cultura, épocas de colheita, clima, manejo da adubação, ocorrência de pragas ou doenças, produtividades anteriores (cana-soca), histórico da área entre outros. Desta forma, o especialista agrega todo seu conhecimento e experiência para estimar a produtividade de determinado talhão. Este procedimento é realizado ao longo da safra, seja para reavaliações quando o canavial passa por algum evento esporádico (geada, veranico, entre outros), ou agregar alguma informação extra.

Deve-se destacar que este procedimento é subjetivo e depende do conhecimento adquirido pelo especialista, e que em áreas de cana-planta onde o mesmo não possui informação da produtividade anterior à possibilidade de erro na estimativa é maior. Como alternativa a este método podem ser empregadas técnicas de modelagem baseadas em imagens multiespectrais, com a finalidade de estimar a produtividade.

O N possui importante papel na adubação da soqueira cana-de-açúcar, uma vez que na maioria dos ensaios de campo a resposta à adubação nitrogenada é positiva. Possui elevada extração (2,1 - 2,4 kg N por tonelada de colmos) e é o segundo nutriente mais extraído do solo, ficando atrás apenas do K. Desta forma, sendo a soqueira cana-de-açúcar responsiva a adubação nitrogenada, tende-se em áreas com deficiência deste nutriente que as folhas se apresentem com tons mais claros de verde, sendo possível capturar esta alteração do verde por sensores multiespectrais.

A obtenção de imagens multiespectrais faz parte da vasta gama de possibilidades pertencentes ao sensoriamento remoto, tais como, avaliar o dinamismo da cobertura do solo e auxiliar no monitoramento de culturas agrícolas, proporcionar imagens com múltiplas resoluções espaciais e temporais. Estas avaliações podem ser feitas por vários métodos de classificação de dados e imagens.

Apesar de diversos trabalhos apresentarem resultados satisfatórios utilizando estas técnicas, a análise combinada de dados provenientes do sensoriamento remoto com variáveis agronômicas que visam estimar a produção da cana-de-açúcar, necessita de mais estudos para elevar a acurácia das estimativas.

Dada a importância do N para soqueira da cana-de-açúcar, aliada à necessidade de gerar uma estimativa de produtividade não subjetiva, objetivou-se com este estudo realizar a estimativa de produtividade da cana-de-açúcar por imagens multiespectrais em experimentos com diferentes doses de fontes líquidas de nitrogênio.

2 REFERÊNCIAS

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Brasil). **Acompanhamento da safra brasileira:** cana-de-açúcar, v. 6. n. 2 - Safra 2019/2020 - Segundo Levantamento. Brasília, DF: CONAB, 2019. 58 p. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em: 19 jun. 2020.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1 Cana-de-açúcar

As cultivares desenvolvidas de cana-de-açúcar são originadas de espécies do gênero *Saccharum*, plantas que se apresentam na forma de touceira, sendo que a parte aérea é formada por colmos, com caule típico da família *Poaceae*, folhas e inflorescências com uma parte subterrânea formada por raízes e rizomas (MOZAMBANI *et al.*, 2006). O desenvolvimento da cultura segue uma sequência de eventos, ou estádios fenológicos, que ocorrem pela interação entre características genéticas da variedade e o ambiente.

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, graças à evolução na produção e área plantada nos últimos anos. No período de 2005 a 2018, a produção cresceu aproximadamente 79%, enquanto o aumento da área plantada foi de 63,5%. Em 2019, o país produziu cerca de 666,5 milhões toneladas de cana-de-açúcar em uma área de 9,6 milhões de hectares (IBGE, 2019), gerando produtividade nacional média de 69 toneladas de cana por hectare. Em relação às regiões produtoras, mais de 50% da produção de cana-de-açúcar do país está concentrada no estado de São Paulo, produzindo 341,8 milhões de toneladas em uma área de 5,1 milhões de hectares. O estado de Goiás é o segundo maior produtor de cana-de-açúcar, sendo responsável por volta de 12% da produção nacional (IBGE, 2019).

Com relação à produção de etanol da cana-de-açúcar no Brasil, na safra 2018/2019 foi de 33,14 bilhões de litros (CONAB, 2019). A cana-de-açúcar tem importante papel ambiental, uma vez que o etanol produzido através do seu processamento é uma das melhores alternativas para substituir combustíveis fósseis e reduzir gases causadores do efeito estufa (MELLO *et al.*, 2014). O álcool ainda é componente obrigatório da gasolina brasileira (27% de álcool anidro), sendo que este percentual ameniza os efeitos negativos da gasolina, uma vez que reduz a emissão de gases do efeito estufa (FIGUEIRA, 2012). Por este motivo, existem diversos programas visando promover a utilização de etanol, afim de amenizar mudanças climáticas (IPCC, 2007).

Com relação à produção de açúcar, estima-se que a produção global deverá aumentar cerca de 1% para safra 2019/2020, passando para 185 milhões de toneladas (USDA, 2019). A safra brasileira é estimada em 30,14 milhões de toneladas (redução de

3,8% em relação à safra anterior), sendo a região centro-sul responsável por 90,7% do total de açúcar produzido, onde São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Goiás e Alagoas são os maiores estados produtores (CONAB, 2019).

2 Crescimento da cana-de-açúcar

O crescimento da cana-de-açúcar pode ser dividido em quatro etapas com características bem diferenciadas. Silva *et al.* (2010), descreve o estágio inicial com brotação e estabelecimento, tendo a propagação da planta a partir de uma ou mais gemas contidas em um rebolo (pedaço de colmo). Em condições favoráveis, a gema brota e tem-se a emergência do primeiro perfilho, sendo que esta fase é dependente das reservas energéticas do rebolo. Na etapa posterior, tem-se o perfilhamento e estabelecimento da cultura, são emitidos vários perfilhos e suas raízes se desenvolvem, de forma que esta é considerada a etapa mais importante no estabelecimento da produção, pois esta etapa define o desenvolvimento do número de colmos adequados à produção daquela touceira. A terceira etapa é de crescimento e desenvolvimento da parte aérea, sendo esta etapa altamente dependente da disponibilidade de água para a planta. O desenvolvimento das folhas que ocorria desde a fase do perfilhamento, agora é acompanhado da fase de alongamento dos colmos, sendo esta etapa responsável por acumular aproximadamente 75% de toda matéria seca. Logo após, os colmos começam a amadurecer gradualmente, em um processo onde um colmo apresenta entrenós mais maduros em sua base e menos maduros na região com folhas verdes, esta diferença é reduzida com o avanço do processo de amadurecimento. O processo de amadurecimento depende de condições desfavoráveis ao desenvolvimento vegetativo, assim, baixas temperaturas e moderado déficit hídrico intensificam o processo de maturação.

Após o corte, raízes e rizomas permanecem no solo para fornecer água e nutrientes para as gemas que irão brotar, assim originando novo ciclo. A planta formada a partir do colmo plantado é conhecida como cana-planta, enquanto a originada da rebrota como cana-soca. Com os sucessivos cortes, ocorre um decréscimo na produtividade a tal ponto que o replantio se faz necessário.

O ciclo da cana-planta depende da sua época de plantio, podendo ser classificados como cana-de-ano, cana-de-ano e meio e cana de inverno. Segato *et al.* (2006) descrevem que para a região centro-sul do Brasil, a cana-de-ano é plantada de setembro a novembro, possuindo assim um ciclo de 12 meses, com o desenvolvimento

máximo de novembro a abril e podendo ser colhida a partir de julho, sendo assim até 8 meses de desenvolvimento e 4 meses para maturação. A cana-de-ano e meio é plantada de janeiro até início de abril, passando por um desenvolvimento inicial limitado no período mais seco e, retomando o desenvolvimento no início das chuvas, tipicamente em setembro e vegetando até abril. Logo, a cana-de-ano e meio tem um período inicial de 3 meses de desenvolvimento, 5 meses com limitada disponibilidade de água no solo mais 7 meses de desenvolvimento, em sequência o amadurecimento no inverno, o que leva a um ciclo de 14 a 21 meses, dependendo da época de maturação e da data de plantio da variedade escolhida. Na maior parte dos casos, a produtividade da cana-de-ano e meio é superior a cana-de-ano, graças ao seu maior período de desenvolvimento. Existe também o plantio nos meses de junho a agosto e estes são conhecidos como cana de inverno ou de 15 meses, e sendo altamente dependentes de estratégias de irrigação capazes de fornecer água para o desenvolvimento inicial da cultura (brotação e perfilhamento). Após a colheita da cana-planta, o ciclo médio da cana-soca é de 12 meses.

Neste sentido, deve-se avaliar a época de plantio visando o clima que a planta estará sujeita durante a etapa de crescimento. Inman-Bamber e Smith (2005) descrevem que é essencial que durante a fase de brotação a água esteja disponível, sendo que após iniciar o perfilhamento, a planta tem certa resistência a períodos de falta de água. Essa resistência se dá pela capacidade da planta de retomar seu crescimento de forma acelerada quando o solo estiver úmido novamente. Em um experimento onde após a irrigação de brotação, a área deixou de ser irrigada por 5 meses, a produtividade final não foi afetada quando comparada a área que recebeu irrigação (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005). Este fato está relacionado à menor necessidade de água pela cultura ao iniciar a fase de maturação. Ressalta-se ainda que o déficit hídrico durante a fase de maturação aumenta a qualidade industrial da cultura.

Diversos autores afirmam que a temperatura afeta diretamente o crescimento da cana-de-açúcar, sendo, a temperatura ótima de crescimento 30°C, necessitando de temperaturas superiores a 18°C e menores que 45°C (MAGALHÃES, *et al.*, 1987). Vale ressaltar que esses são valores médios e cada variedade e que plantas submetidas a temperaturas superiores a 30°C não possuem crescimento limitado desde que haja disponibilidade de água (EBRAHIM *et al.*, 1998; GLASZIOU *et al.*, 1965). Pode-se visualizar o efeito temperatura *versus* crescimento na Figura 1.

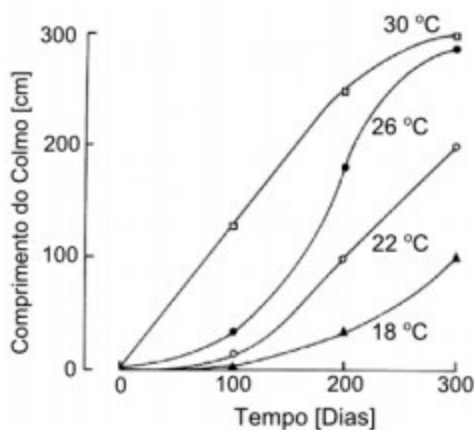


Figura 1. Crescimento do colmo de acordo com tempo e temperatura, adaptado Glasziou *et al.* (1965).

A escolha da alocação de cada variedade leva em consideração o ambiente de produção da área de cultivo. De acordo com Prado *et al.* (2010) o ambiente de produção é definido como a combinação de variáveis do solo, tais como, condições físicas, hídricas, morfológicas, químicas e mineralógicas com o manejo, condições de subsuperfície e o clima regional. Em síntese, os mesmos autores destacam que a disponibilidade de água pode reduzir drasticamente a produtividade, sendo, dependente de vários fatores como o regime de chuvas, textura do solo, teor de matéria orgânica, mineralogia, presença gradiente textural, impedimentos físicos ao desenvolvimento do sistema radicular e profundidade. Outros dois componentes, textura e profundidade são relacionados com a disponibilidade de água, desenvolvimento das raízes e também o volume de solo explorado pelas raízes. A fertilidade do solo é considerada pelos autores um componente essencial para altas produtividades. Desta forma, o manejo da camada arável deve ser realizado para favorecer o desenvolvimento das plantas.

Landell *et al.* (2003) destacam a importância das características químicas de subsuperfície, uma vez que está relacionada com as produtividades do terceiro corte em diante, enquanto nos dois primeiros estão relacionadas com as características químicas da camada arável. A cana-de-açúcar é cultivada em diversos solos e climas existentes e isto produz uma imensidade de ambientes de produção que vão relacionar-se com as características genéticas da planta e definirão a produtividade agrícola, que ainda é condicionada a outros fatores como ocorrência de pragas, doenças e geadas (LANDELL; BRESSIANI 2008). Landell e Bressiani (2008) analisando o efeito da

época de colheita na qualidade da matéria-prima ao longo da safra observaram que a influência da época de colheita com os tipos de solo podem ser agrupados em favoráveis, médios e desfavoráveis, podendo ser representada em uma matriz de ambientes, com implicações no manejo varietal e explorados ganhos gerados pela interação entre genótipo e ambiente.

3 Nitrogênio no ambiente e sua importância

O N é o nutriente de maior interação no ambiente por causa das inúmeras reações que ele participa no solo, onde estas geralmente são realizadas por microrganismos e suas atividades são afetadas pela temperatura e umidade, além de existir diversas rotas de perdas (CANTARELLA, MONTEZANO, 2010). Este macronutriente primário é encontrado em apenas 1% da biomassa seca total das plantas (EPSTEIN, BLOOM, 2006).

Caso o suprimento de N seja ineficiente as plantas vão reduzir a síntese de clorofila e aminoácidos essenciais, que por consequência irão reduzir a quantidade de energia disponível e com isso a formação de esqueletos carbônicos e carboidratos afetando diretamente o desenvolvimento da planta (MALAVOLTA, 2006). Durante o processo de aplicação do N-fertilizante até sua absorção pela planta, o N passa por reações de oxirredução e por isto lhe confere grande variação de valência, podendo ocorrer na forma oxidada (nitrato – NO_3^-) ou na forma reduzida (amônio – NH_4^+), sendo importante discernir qual a forma está sendo fornecida a planta (CANTARELLA, MONTEZANO, 2010), considerando-se o alto gasto energético das plantas nas reações fisiológicas, como, por exemplo, na redução do nitrato para amônio (EPSTEIN, BLOOM, 2006).

A matéria orgânica é o grande estoque de N no solo, representando mais de 95%. Entretanto, o N orgânico não é diretamente aproveitado pelos vegetais necessitando que ocorra a sua mineralização originando o amônio, podendo este ser absorvido ou transformado a nitrato (processo de nitrificação) o qual também é absorvido pelas plantas (CANTARELLA, MONTEZANO, 2010). A nitrificação é potencializada em temperaturas entre 25 e 40° C, umidade do solo entre 50 e 70 % e pH próximo a 6,5 (DANCER *et al.*, 1973). Nessas condições a nitrificação é máxima, de modo que em poucos dias ou semanas a maior parte do N amoniacal proveniente da matéria orgânica ou de fertilizantes se transforma em nitrato, o qual por possuir carga negativa é pouco retido no solo, ficando sujeito a perdas por lixiviação.

No Brasil a perda de N por lixiviação, está diretamente relacionada à textura do solo e regime pluviométrico da região de cultivo (GHIBERTO *et al.*, 2009). Analisando a lixiviação de nitrato em 10 experimentos utilizando fertilizante marcado em átomos de ^{15}N , Cantarella (2007) demonstrou que a quantidade de N lixiviado é pequena devido as baixas doses de N aplicadas e ao parcelamento da adubação realizado na maioria dos experimentos (CANTARELLA, MONTEZANO, 2010). Estudos recentes (GHIBERTO *et al.*, 2015) têm demonstrado uma situação diferente quando avaliado a lixiviação do nitrato em áreas de cana-de-açúcar (cana soca) cultivada no Estado de São Paulo (Argissolo) onde perdas de até $22,5 \text{ kg ha}^{-1}$ do N-fertilizante aplicado ($100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$) por lixiviação. Maiores perdas por lixiviação em cana-soca estão possivelmente relacionados à proximidade entre o período de aplicação do fertilizante (na maioria das vezes entre julho a novembro) e o início do período chuvoso (outubro a novembro), além de na maioria dos casos adotar a aplicação superficial do fertilizante, que diminui o contato com o solo ocasionando perdas por *runnoff* (escoamento superficial).

Outra rota de perda do N no sistema solo-planta-atmosfera é a desnitrificação. A desnitrificação é o processo de redução biológica do nitrato ou do nitrito até a forma gasosa de N_2 passando por outras formas intermediárias de N com destaque para o óxido nitroso (NO_2), cuja emissão para atmosfera provoca um efeito estufa 300 vezes maior que o dióxido de carbono (AITA, GIACOMINI, 2007). Por isso, o processo de desnitrificação é prejudicial sob a ótica agrícola (diminuição de N mineral para as culturas) como também na intensificação do efeito estufa. Ambientes deficientes em oxigênio favorecem a perda de N por desnitrificação e esses podem existir mesmo em solos com aerobiose predominante, uma vez que o trânsito de máquinas na lavoura em condições de elevada umidade do solo e a ocorrência de chuvas são fatores precursores da anaerobiose localizada e temporária, devido ao acúmulo de água em microssítios no interior dos agregados do solo dificultando assim a difusão do oxigênio. Além disso, a adição de quantidades elevadas de materiais orgânicos facilmente decompostos promove o aumento da população microbiana heterotrófica (utilizam substrato orgânico como fonte de energia e Carbono para seu metabolismo) e consequentemente a competição pelo oxigênio (CANTARELLA, 2007).

A volatilização da amônia é outra rota de perda do N oriundo do fertilizante. No Brasil devido à predominância de solos ácidos, a aplicação superficial da ureia (fertilizante com baixo custo de aquisição - $\text{R\$ kg}^{-1} \text{ N}$) resulta em perdas de até 70% do N na forma de amônia (CANTARELLA, MONTEZANO, 2010). Todavia em condições

de campo nem sempre ocorrem esses altos índices de perdas devido à ocorrência de algumas situações que a reduzem, como por exemplo, a liberação de H^+ na transformação do amônio em amônia reduz o potencial de perdas do nitrogênio amoniacal remanescente no solo. Assim se estima que as perdas médias de N oriundas da volatilização da amônia representem de 20 a 40% (CANTARELLA, MONTEZANO, 2010). Em ensaios executados a campo para quantificar a volatilização da amônia na cultura da cana-de-açúcar, perdas de até 25% do N aplicado foram obtidos (CANTARELLA *et al.*, 2008; MARIANO *et al.*, 2012), e ensaios em condições controladas (laboratório, casa de vegetação) as perdas obtidas foram entre 28 a 37% do N aplicado (SOARES *et al.*, 2012).

A complexidade e as múltiplas rotas das reações do N no solo, as inúmeras possibilidades e magnitudes de perdas do N são razões da baixa eficiência na utilização do mesmo, sendo relatada em diversos trabalhos (TRIVELIN *et al.*, 2002; VEIRAMEGDA *et al.*, 2015). A determinação da dose de N a ser aplicada na cana-de-açúcar leva em consideração a extração e exportação pela cultura (PRADO, PANCELLI, 2008; FERREIRA *et al.*, 2015), associado a estimativa da produção sem considerar o que o solo é capaz de fornecer ao longo do ciclo da planta (CIAMPITTI *et al.*, 2013). Há também o desafio de desenvolver um método de análise de solo que auxilie na predição da disponibilidade de N para as plantas sendo que atualmente não existe um consenso sobre os procedimentos eficientes para tal avaliação (GRIFFIN, 2008). Nesse contexto o setor canavieiro de modo a simplificar o manejo da fertilização nitrogenada adotou práticas pouco eficientes como por exemplo, a aplicação do N-fertilizante sobre a camada de palha proveniente da colheita.

4 Adubação nitrogenada na soqueira da cana-de-açúcar

A transição da colheita da cana queimada para cana crua resultou em grande alteração para o setor canavieiro. Na colheita da cana crua, grande parte do material vegetal (folhas secas e ponteiros) é deixado sobre o solo (FRANCO *et al.*, 2013), alterando a dinâmica dos nutrientes no solo (FERREIRA *et al.*, 2015), devido à baixa mineralização e liberação do N da palhada (VITTI, *et al.*, 2008) graças a alta relação C:N (100:1) desse material vegetal (ROBERTSON, THORBURN, 2007).

No primeiro momento, por ocasião da decomposição da biomassa os microrganismos retiram do solo parte do N necessário para decompor o C e isto gera uma competição com a planta (TRIVELIN *et al.*, 2013). De modo geral, nas condições

de cultivo brasileiras, após três anos cerca de 70% de toda matéria seca é decomposta, liberando assim nutrientes como K, Ca e N (FORTES *et al.*, 2013). Somente após 40 anos da adoção da colheita da cana crua é que será gerado um estoque de cerca de 40 kg ha⁻¹ de N no solo (TRIVELIN *et al.*, 2013). O longo tempo necessário para completa liberação do N da palhada pode ser justificado pelo fato da taxa de mineralização desses resíduos depender de algumas características como: composição bioquímica do resíduo - teores totais de lignina, celulose, hemicelulose e polifenóis (PAULY, KEEGSTRA, 2008), fatores climáticos (GONÇALVES *et al.*, 2010), evapotranspiração, umidade, aeração e temperatura do solo (BALL-COELHO *et al.*, 1993) e a localização e contato desses resíduos com a microbiota do solo (SINGH *et al.*, 2008).

Em contrapartida, a presença da palha pode afetar a produtividade da cana-de-açúcar, por gerar falhas nas rebrotas, pelo fato de algumas variedades comerciais plantadas no Brasil terem sido melhoradas visando o sistema de colheita de cana queimada (TAVARES *et al.*, 2010). Alguns trabalhos apresentam impacto negativo da palhada sobre a produtividade da cana-de-açúcar (BASANTA *et al.*, 2003; PRADO, PANCELLI, 2008; CAMPOS *et al.*, 2010), outros apresentam impacto positivo (TRIVELIN *et al.*, 2002; CARVALHO *et al.*, 2013), portanto uma análise conjunta do sistema de colheita da cana crua com o solo e o rendimento potencial das variedades determinará respostas positivas referentes a produtividade da soqueira da cana-de-açúcar (CONTIM, 2007).

Todavia, a cultura da cana-de-açúcar necessita absorver o N para produzir colmos, sendo que de modo geral, são extraídos cerca de 100 a 300 kg ha⁻¹ de N produzindo cerca de 100 t ha⁻¹ de colmos (THORBURN *et al.*, 2005; CANTARELLA *et al.*, 2007; FRANCO *et al.*, 2008), e aproximadamente 50% dessa extração é exportada para os colmos (CANTARELLA *et al.*, 2007). As doses recomendadas variam entre 80 a 250 kg ha⁻¹ de N para cana crua (CANTARELLA, ROSSETTO, 2014). Estas recomendações levam em consideração a extração de N pela cana-de-açúcar para produção de uma tonelada de colmos, sendo que para região centro sul os valores médios de extração médios são de 0,7 a 1,8 kg de N para cada tonelada de colmo produzida (COLETTI *et al.*, 2006; CANTARELLA *et al.*, 2008; TASSO JUNIOR *et al.*, 2007; FRANCO *et al.*, 2008).

De modo geral, a aplicação do N fertilizante nas soqueiras é realizada aproximadamente 30 a 40 dias após o corte e visa repor o N exportado com os colmos. No Brasil, diversos trabalhos demonstraram acréscimos de TCH da cana-de-açúcar em

resposta à adubação nitrogenada (VITTI *et al.*, 2007; FRANCO *et al.*, 2010; FORTES *et al.*, 2013), porém existem divergências em relação a dose de N que proporciona a máxima produtividade econômica (OTTO *et al.*, 2016). Korndorfer *et al.* (2002) obtiveram acréscimos médios de 10 TCH com a aplicação de 60 kg ha⁻¹ de N. Fortes *et al.* (2011) obtiveram produtividade máxima com a aplicação de 100 kg ha⁻¹ de N, enquanto que na produtividade média de três soqueiras, a dose de N que promoveu maior incremento na TCH foi 120 kg ha⁻¹ de N (FORTES *et al.*, 2013). Castro *et al.* (2014) obtiveram ganhos de até 13 TCH ao se aplicar 130 kg ha⁻¹ de N.

5 Fertilizantes líquidos e suas características

Em áreas de soqueira da cana-de-açúcar, é quase unanimidade a aplicação de vinhaça (subproduto da destilação do etanol) um fertilizante líquido que é fonte de potássio, sendo sua aplicação capaz de suprir a necessidade da cultura deste elemento. Ela também é fonte de macro e micronutrientes, como N mineral, mas sua concentração não é capaz de fornecer o N requerido pela cultura, e por isto, não substitui a adubação nitrogenada (CANTARELLA e ROSSETO, 2010). Em razão do menor custo por unidade de N da ureia, o alto custo do N contido no sulfato de amônio e as restrições impostas no transporte do nitrato de amônio devido ao seu alto risco explosivo, a ureia é atualmente a fonte mais utilizada no Brasil (CANTARELLA *et al.*, 2008). Entretanto, o fornecimento do N mineral pode ser realizado através da aplicação de aquamônia (NH₃ aquosa – conc. 0,18 kg L⁻¹ de N). Esta fonte possui alto índice de perdas por emissão de NH₃, quando aplicada em superfície, sendo uma alternativa para aumentar a eficiência na adubação é sua incorporação (BOARETTO *et al.*, 1991).

Neste cenário, de baixa eficiência da adubação nitrogenada, existe a alternativa da utilização do adubo líquido uran (32% de N); em comparação entre as aplicações utilizando uran e ureia, as perdas por volatilização foram menores quando utilizado o fertilizante líquido (17% v.s. 54%) (LARA CABEZAS *et al.*, 2000). Tal resultado pode ser fundamentado na menor concentração amídica presente no uran (16% de N-NH₂). A composição também fornece a forma nítrica (8% de N-NO₃⁻) e amoniacal (8% de N-NH₄⁺); dentre as quais, as plantas de cana-de-açúcar possuem preferência pela absorção do NH₄ (ROBINSON *et al.*, 2011).

As principais especificações dos fertilizantes líquidos são referentes à concentração do nutriente, densidade, viscosidade e tamanho das partículas. Entre as vantagens no uso dos adubos líquidos, estão: melhor controle da uniformidade de

aplicação, menor segregação de nutrientes, versatilidade das formulações N-P-K (permite mistura de micronutrientes na calda de aplicação) e menor consumo de energia na produção; em contraposição, entre as desvantagens, são apontadas: a necessidade de agitação durante a aplicação de fluidos com partículas em suspensão, riscos de acidentes em operação com amônia anidra e entupimento dos injetores causado pela precipitação de partículas (KORNDÖRFER *et al.*, 1995).

Com isso, conclui-se que o processo de adubação utilizando fertilizante líquido é influenciado principalmente pela fonte nitrogenada (uran, ureia, aquamônia, biofertilizante líquido, dentre outras) e qualidade da operação (uniformidade de aplicação e desvio em relação à dosagem recomendada pela orientação agrônômica). Tais questões, junto à determinação da dosagem espacialmente apropriada às plantas, são fundamentais para a implementação de processo para aplicação eficiente alinhada aos princípios das boas práticas de manejo da adubação em cana-soca.

Uma das principais fontes líquidas de N é o Uran (Uan), apresentando na sua composição o N nas formas Nítrica, Amídica e Amoniacal, sendo geralmente formulado com 33-35% de Ureia e 45-47% de Nitrato de Amônio (MALAVOLTA, 2006).

6 Sistemas de monitoramento agrícola no Brasil

Com a finalidade de realizar planejamento estratégico adequado a previsão de safras e sua localização no espaço geográfico é de suma importância. No Brasil, a previsão de safras é realizada pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) e pelo Instituto Nacional de Geografia e Estatística (IBGE) em comum acordo com diversos órgãos de todas as esferas.

O IBGE implementou em 1972 o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA)¹ no país. A investigação é feita respeitando as particularidades de cada região, sendo estes dados obtidos mensalmente por técnicos do IBGE e/ou órgãos estaduais/municipais, sempre contando com a colaboração de produtores que respondem a um questionário e entrevistas (IBGE, 2011).

Desde 2005, a CONAB promove levantamentos e avaliações quadrimestrais da safra brasileira de cana-de-açúcar (CONAB, 2005). A metodologia da CONAB consiste em visitar produtores de cana-de-açúcar com questionário, posteriormente é realizada amostragem e confecção dos relatórios.

1 disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/lspa>.

Os levantamentos de safra organizados por órgãos federais são dependentes de informações levantadas em campo, podendo-se constatar algumas limitações quanto ao tempo necessário para se realizar tal levantamento, bem como a quantidade de pessoas aptas a tal atividade e, parcialidade inerente ao processo. Uma alternativa é a utilização de técnicas de sensoriamento remoto, que proporcionam dados representativos e de menor custo. Estas técnicas, se aplicadas de forma correta, podem gerar resultados mais satisfatórios e confiáveis (ABDEL-RAHMAN; AHMED, 2008).

Desta forma, estimativas de produtividades com elevada acurácia são extremamente importantes para a indústria canavieira, uma vez que pode alterar sua política de preços, planejamento de início e final de safra, além das taxas de abastecimento e moagem industrial (SCHIMIDT et al., 2001).

7 Agricultura 4.0

A partir da Conferência de Hannover (2011), o conceito de Indústria 4.0 foi apresentado ao mundo. Este conceito é a integração de tecnologias (Big Data, serviços em nuvem, segurança cibernética, robôs autônomos, internet das coisas, sensores sem fio, entre outras) que proporcionam transformações na forma que organizações atuem junto às grandes mudanças nos modelos de negócios e processos de fabricação. A adoção destas tecnologias permite a transformação das organizações em colaboração computacional que estão em conexão com o mundo físico e seus processos, e ao mesmo tempo, acessando dados e serviços de processamento de dados disponíveis na Internet (MONOSTORI, 2014).

É notório que esta revolução tecnológica tem possibilitado avanços a diversos setores, como a agricultura. Atualmente, várias tecnologias dão suporte ao setor primário da economia, no sentido de fornecer dados e aprimorar a capacidade de monitoramento e tomada de decisões, como navegação por satélite e sensores, computação em rede (AQEEL-UR-REHMAN, 2017).

Neste contexto, a agricultura 4.0 faz uso de tecnologias e métodos também empregados na indústria 4.0, com conceitos importantes como agricultura de precisão e a pecuária de precisão, automação e robótica agrícola, além de técnicas *big data* e internet das coisas. Todas as tecnologias contribuem para aumentar a sustentabilidade do setor, aumentando a eficiência no uso de insumos, reduzindo custos com mão de obra, melhorando a qualidade do trabalho e segurança dos trabalhadores, além de reduzir impactos ao meio ambiente (MASSRUHÁ, LEITE, 2017).

8 Produtividade dos cultivos

A produtividade agrícola é definida como o total de uma produção em uma determinada área. Existem diversas formas de estimar a produtividade dos cultivos, sendo uma delas através dos Índices de Vegetação (IV). Fomaggio e Sanches (2017) descrevem como sendo atualmente o mais empregado o NDVI para esta finalidade.

A finalidade da confecção de mapas de produtividade está relacionada ao conhecimento da variedade presente na lavoura para, depois, investigar o que causa esta variabilidade e realizar ações localizadas, afim de reduzindo eventuais gastos desnecessários no talhão e, aumentando assim a lucratividade da lavoura. Desta forma, o conhecimento da variabilidade da produtividade dentro da lavoura é essencial, não somente para quantificar lucros, mas também auxiliar com informações valiosas a tomada de decisão, tornando-a assim uma ótima ferramenta para agricultura de precisão.

Com a finalidade de estimar a produtividade através de imagens, torna-se necessário o estabelecimento de relações entre o banco de dados de imagens e os parâmetros biofísicos avaliados em campo. Formaggio e Sanches (2017) citam a possibilidade de se acoplar sensores em colhedoras para mensurar a relação peso/área, para, assim, gerar um mapa de produtividade do local.

9 Sensoriamento remoto da vegetação

Uma das várias aplicações do sensoriamento remoto é sobre a vegetação. Esta técnica estuda a propagação da Radiação Eletromagnética (REM) sobre a vegetação, sendo sua aplicação desde florestas e matas fechadas até lavouras comerciais. Apesar de existirem inúmeras espécies vegetais tais quais com as particularidades de suas folhas, em todas elas a propagação da REM se dá em comprimentos de ondas, sendo explicado pela fisiologia vegetal (PONZONI; SHUMABUKURO; KUPLICH, 2012).

Os pigmentos fotossintetizantes absorvem os comprimentos de onda do visível (~400 – 700 nm). Desta forma, a REM nesta região será refletida com maior intensidade, assegurando uma reflectância significativa na região do espectro eletromagnético. Existem diversos fatores que podem alterar a REM de uma folha, ressaltando-se a presença da água que possui facilidade de adsorver radiações e por consequência reduzir a energia refletida (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012). Observa-se na figura 2 a curva de reflectância de uma folha saudável

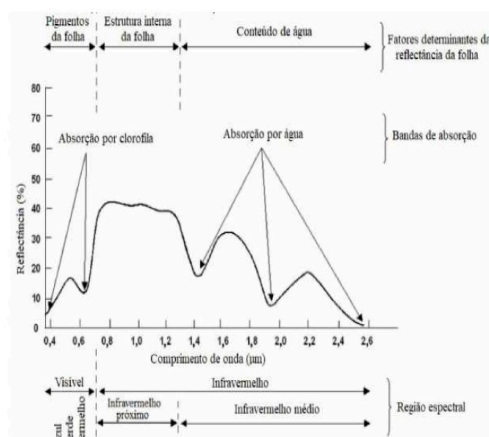


Figura 2: Curva de reflectância típica da vegetação. FONTE: Adaptada de Swain e Davis (1978, p. 232).

A cultura da cana-de-açúcar apresenta características favoráveis ao uso das ferramentas do sensoriamento remoto, pois é cultivada em extensas áreas e também apresenta um dossel uniforme. Desta forma, o cálculo de índices de vegetação como o índice de área foliar, o NDVI (PELLEGRINO, 2001; SIMÕES et al., 2005) podem ser realizados e aplicados em alguns casos práticos, como na existência de relação entre o índice de área foliar e a produtividade da cana-de-açúcar (SIMÕES et al., 2005)

10 Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP)

As ARP se apresentam em constante evolução tecnológica, graças à rápida difusão no meio agrícola e à maior exigência em relação às características técnicas. Os primeiros testes com fotogrametria foram realizados em 1979, sendo Zischinsky et al. (2000) responsáveis por gerar modelo 3D de uma mina. Com o passar do tempo, esta tecnologia foi difundida no meio agrícola, se tornando hoje uma importante ferramenta de auxílio na tomada de decisão (SIMOES, SOLER, PY., 2017).

Atualmente, existe a necessidade de monitorar continuamente lavouras durante o seu ciclo, com isto as ARP ganham espaço na agricultura. Por apresentar boa resolução temporal, quando comparadas a sensores orbitais que obedecem ao cumprimento da órbita da Terra, a periodicidade não pode ser quebrada. As imagens obtidas por ARPs podem ser captadas a qualquer momento, dependendo apenas de luz solar e tempo seco (DAMIAN et al., 2016).

Existe no Brasil legislação vigente para uso de ARP, podendo ser encontrada de forma adicional na Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), Agência Nacional de

Telecomunicações (ANATEL) e Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) (ANAC, 2017).

11 Processamento digital de imagens

Gonzalez e Woods (2009) definem imagem como uma função bidimensional, $f(x,y)$, sendo x e y coordenadas espaciais, e os valores assumidos por esta função podem ser chamados de intensidade ou nível de cinza de um determinado ponto. Quando x,y e a intensidade de f se apresentam em quantidades finitas e descritas são consideradas imagem digital. Sendo assim, uma imagem digital é composta por um número finito de elementos, cada um com sua localização e valores específicos. Existem diversas nomenclaturas para estes elementos, a mais utilizada é *pixel*.

O processamento de uma imagem digital não é tarefa simples, uma vez que abrange várias tarefas interconectadas. A primeira etapa é a captura da imagem, que se dá por sensores capazes de captar a reflectância do material de interesse vindo em sequência o pré-processamento, o qual envolve atividades de filtragem de ruídos e correção de eventuais distorções causadas pelo sensor (ACHARYA; RAY, 2005).

12 Índices de vegetação

Índices de vegetação são transformações lineares de bandas espectrais, sendo sua maioria na faixa do vermelho e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético. Segundo Baret et al. (1989), este espectro representa 90% da variação presente na resposta espectral da vegetação. Huete et al. (2002) estabelece os índices de vegetação capazes de designar as propriedades da vegetação e conceder comparações espaciais e temporais confiáveis, proporcionando monitoramento das variações sazonais, interanuais e dos parâmetros biofísicos da vegetação a longo prazo.

Desta forma, existe uma gama de possibilidades para aplicação dos índices de vegetação, possibilitando a definição de zonas de manejo, auxílio do funcionamento de sistemas de irrigação (TOUREIRO et al., 2017), controle de plantas infestantes (HUANG et al., 2016) e na estimativa da produtividade das safras agrícolas (MOSLEH et al., 2015). Sendo que para o último, apresenta elevada importância prática, auxiliando produtores no gerenciamento da sua produção e também na definição do preço dos produtos gerados (MOSLEH et al., 2015).

Sendo assim, o avanço da agricultura digital proporcionado pelo advento das ferramentas computacionais, como *Machine Learning* (aprendizado de máquinas), Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP), sensores (multiespectrais, termais), tem possibilitado coleta de dados que municiam os tomadores de decisões das propriedades agrícolas.

13 Descritores de imagens por textura

Dentro das possibilidades existentes no processamento digital de imagens, um dos processos mais complexos é o de classificar padrões existentes na mesma. Existem diversas técnicas que visam reduzir o custo computacional e que também permitam utilizar os dados extraídos nas mais variadas aplicações (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008).

O diagnóstico por imagem se apresenta como uma poderosa técnica de investigação. Após a extração dos padrões existentes em uma imagem, esta informação se torna importantíssima no auxílio à tomada de decisão em diversas áreas como no sensoriamento remoto, medicina e microscopia (NASCIMENTO, 2003). Assim sendo, o ajuste correto das técnicas de melhorias e sua classificação são de extrema importância para que as imagens obtidas e seu processamento se tornem um importante instrumento auxiliar significativo para tomada de decisões.

Reconhecida a real necessidade de uma técnica computacional que permita classificar padrões existentes em uma imagem e que não possuam elevado custo computacional, tem-se a possibilidade de recorrer a uma característica natural para interpretar informações visuais: a textura. Existem padrões de textura nas imagens, como sua distribuição espacial, luminosidade e arranjo estrutural da superfície em relação às regiões vizinhas.

Com a análise de textura em uma imagem, têm-se a classificação da mesma. Tornando-se possível identificar características da imagem independentemente da sensibilidade de quem a analisa. Tal operação torna a classificação por textura uma importante ferramenta para diversas áreas, como calcificações em mamografias (FERNANDES, 2008), sensoriamento remoto (NASCIMENTO; MADEIRA; PEDRINI, 2003), padrões de folhas em lavouras (SANTOS, 2009).

REFERÊNCIAS

- ABDEL-RAHMAN, E. M.; AHMED, F. B. The application of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum spp. hybrid*) production: a review of the literature. **International Journal of Remote Sensing**, [s. l.], v. 29, n. 13, p. 3753–3767, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160701874603>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160701874603?journalCode=tres20>. Acesso em: 4 nov. 2019.
- ACHARYA, T.; RAY, A. K. **Image processing: principles and applications**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005. DOI: <https://doi.org/10.1002/0471745790>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/0471745790>. Acesso em: 19 jun. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (Brasil). **Regras da ANAC para uso de drones entram em vigor**. Brasília, DF, 2 maio 2017. Disponível em: <http://www.anac.gov.br/noticias/2017/regras-da-anac-para-uso-de-drones-entram-em-vigor>. Acesso em: 19 jun. 2019.
- AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Matéria orgânica do solo, nitrogênio e enxofre nos diversos sistemas de exploração agrícola. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C. (ed.) **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba, SP: International Plant Nutrition Institute (IPNI), 2007. p. 1-42.
- AQEEL-UR-REHMAN.; SHAIKH, Z. A. Smart agriculture. In: ZUBAIRI, Junaid Ahmed (ed.). **Application of modern high-performance networks**. [S. l.]: Bentham Science Publishers, 2017. p. 120-129. DOI: <https://doi.org/10.2174/978160805077210901010120>. Disponível em: <https://www.eurekaselect.com/51619/chapter/smart-agriculture>. Acesso em: 4 nov. 2019.
- BALL-COELHO, B.; TIESSEN, H.; STEWART, J. W. B.; SALCEDO, I. H. SAMPAIO, E. V. S. B. Residue management effects on sugarcane yield and soil properties in Northeastern Brazil. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 85, n. 5, p. 1004-1008, set. 1993.
- BARET, F.; GUYOT, G.; MAJOR, D. TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 12., 1989, Vancouver, Canada. IEEE, p. 1195-1197, jul. 1989. DOI: <https://doi.org/10.1109/igarss.1989.576128>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/576128>. Acesso em: 19 jun. 2019.
- BASANTA, M. V.; DOURADO NETO, D.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; OLIVEIRA, J. C. M.; TRIVELIN, P. C. O.; TIMM, L. C.; TOMINAGA, T. T.; CORRECHEL, V.; CÁSSARO, F. A. M.; PIRES, L. F.; MACEDO, J. R. Management effects on nitrogen recovery um a sugarcane crop grown in Brazil. **Geoderma**, [s. l.], v. 116, n. 1-2, p. 235-248, set. 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0016-7061\(03\)00103-4](https://doi.org/10.1016/s0016-7061(03)00103-4). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706103001034>. Acesso em: 19 jun. 2019.

BOARETTO, A. E.; CRUZ, A. P.; LUZ, P. H. C. **Adubo líquido**: produção e uso no Brasil. Campinas: Fundação Cargil, 1991.

CANTARELLA, H.; ROSSETTO, R. Fertilizers for sugarcane. *In*: CORTEZ, Luis Augusto Barbosa. **Sugarcane bioethanol**: R&D for productivity and sustainability. São Paulo: Edgard Blücher, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5151/BlucherOA-Sugarcane-SUGARCANEETHANOL> 39. Disponível em: <https://openaccess.blucher.com.br/article-details/19258>. Acesso em: 19 jun. 2019.

CANTARELLA, H.; MONTEZANO, Z.F. Nitrogênio e Enxofre. *In*: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (ed.). **Boas práticas para o uso eficiente de fertilizantes**: nutrientes. Piracicaba, SP: IPNI, 2010. p. 5-72. 2 v.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O.; CONTIN, T. L. M.; DIAS, F. L. F.; ROSSETTO, R.; MARCELINO, R.; COIMBRA, R. B.; QUAGGIO, J. A. Ammonia volatilisation from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, n. 4, p. 397-401, jul./ago. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0103-90162008000400011>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162008000400011&lng=en&tlng=en. Acesso em: 24 jun. 2019.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ-VENEGAS, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (ed.) **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375-470.

CAMPOS, L. H. F.; CARVALHO, S. J. P.; CHRISTOFFOLETI, P. J.; FORTES, C.; SILVA, J. S. Sistemas de manejo da palhada influenciam acúmulo de biomassa e produtividade da cana-de-açúcar (var. RB855453). **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 32, n. 2, p. 345-350, abr. 2010. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v32i2.3703>. Disponível em: <http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/issue/view/427>. Acesso em: 25 jun. 2019.

CARVALHO, J. L. N.; OTTO, R.; FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O. Input of sugarcane post-harvest residues into the soil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, n. 5, p. 336-344, set./out. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0103-90162013000500008>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162013000500008&lng=en&tlng=en. Acesso em: 25 jun. 2019.

CASTRO, S. G. Q.; FRANCO, H. J. C.; MUTTON, M. A. Harvest managements and cultural practices in sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 1, p. 299-306, jan./fev. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832014000100030>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832014000100030&lng=en&tlng=en. Acesso em: 25 jun. 2019.

CIAMPITTI, I. A.; CAMBERATO, J. J.; MURRELL, S. T.; VYN, T. J. Maize nutrient accumulation and partitioning in response to plant density and nitrogen rate: I. Macronutrients. **Agronomy Journal**, Madison, WI, v. 105, n. 3, p. 783-795, maio 2013. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0467>. Disponível em:

<https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2134/agronj2012.0467>. Acesso em: 25 jun. 2019.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Brasil). **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar**, v. 6, n. 2 - Safra 2019/2020 - Segundo Levantamento. Brasília, DF: CONAB, 2019. 58 p. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em: 19 jun. 2019.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Brasil). **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar**, v.3, n. 4 - Safra 2005/2006 – Quarto Levantamento. Brasília, DF: CONAB, abril 2017. 77 p. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar/item/download/17727_4e54c5103a0ab4a15529e35307c79b2e .Acesso em: 4 nov. 2019.

DANCER, W. S.; PETERSON, L. A.; CHESTERS, G. Ammonification and nitrification of N as influenced by soil pH and previous N treatments. **Soil Science society of America Journal**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 67-69, jan./fev. 1973. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1973.03615995003700010024x>. Disponível em: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1973.03615995003700010024x>. Acesso em: 25 jun. 2019.

EBRAHIM, M. K.; ZINGSHEIM, O.; EL-SHOUBAGY, M. N.; MOORE, P. H.; KOMOR, E. Growth and sugar storage in sugarcane grown at temperatures below and above optimum. **Journal of Plant Physiology**, [s. l.], v. 153, n. 5-6, p. 593–602, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0176-1617\(98\)80209-5](https://doi.org/10.1016/s0176-1617(98)80209-5). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0176161798802095>. Acesso em: 25 jun. 2019.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2. ed. Londrina: Planta, 2006. 402 p.

FERNANDES, S. R.; LEITE, C. A. F. T.; C. JUNIOR, C. A.; ASSIS, J. T. Diagnóstico Auxiliado Por Computador Para Detecção, Identificação e Classificação de Microcalcificações em Mamografias Digitais. In: ENCONTRO DE MODELAGEM COMPUTACIONAL, 11., 2008, Volta Redonda, RJ. **Anais [...]**. Volta Redonda, RJ: [s. n.], 2008.

FERREIRA, D. A.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; VITTI, A. C.; FORTES, C.; FARONI, C. E.; GARSIDE, A. L.; TRIVELIN, P. C. O. Contribution of N from green harvest residues for sugarcane nutrition in Brazil. **Global Change Biology Bioenergy**, [s. l.], v. 8, n. 5, p. 859-866, set. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12292>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcbb.12292>. Acesso em: 25 jun. 2019.

FORTES, C.; VITTI, A.C.; OTTO, R.; FERREIRA, D.A.; FRANCO, H.C.J.; TRIVELIN, P.C.O. Contribution of nitrogen from sugarcane harvest residues and urea for crop nutrition. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 70, n. 5, p. 313-320, set./out. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0103-90162013000500005>. Disponível em:

https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162013000500005&lng=en&tlng=en. Acesso em: 25 jun. 2019.

FORTES, C.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OTTO, R.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.. Stalk and sucrose yield in response to nitrogen fertilization of sugarcane under reduced tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 48, n. 1, p. 88-96, jan. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2013000100012>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2013000100012&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 26 jun. 2019.

FORTES, C.; TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C.; FERREIRA, D. A.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R. Recovery of Nitrogen (15N) by sugarcane from previous crop residues and urea fertilization under a minimum tillage system. **Sugar Tech**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 42-46, jan./mar. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12355-011-0074-4>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12355-011-0074-4>. Acesso em: 26 jun. 2019.

FRANCO, H. C. J.; PIMENTA, M. T. B.; CARVALHO, J. L. N.; MAGALHÃES, P. S. G.; ROSSELL, C. E. V.; BRAUNBECK, O. A.; VITTI, A. C.; KOLLN, O. T.; ROSSI NETO, J. Assessment of sugarcane trash for agronomic and energy purposes in Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, n. 5, p. 305-312, set./out. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0103-90162013000500004>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162013000500004&lng=en&tlng=en. Acesso em: 26 jun. 2019.

FRANCO, H. C. J., TRIVELIN, P. C. O., FARONI, C. E., VITTI, A. C., OTTO, R. Stalk yield and technological attributes of planted cane as related to nitrogen fertilization. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, n. 5, p. 579–590, set./out. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0103-90162010000500012>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162010000500012&lng=en&tlng=en. Acesso em: 26 jun. 2019.

FRANCO, H. C. J.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C.; OTTO, R.; FARONI, C. E.; SARTORI, R. H.; TRIVELIN, M. O. Acúmulo de nutrientes pela cana-planta. **STAB**, Piracicaba, v. 26, n. 5, p. 47-51, maio/jun. 2008.

GHIBERTO, P. J.; LIBARDI, P. L.; TRIVELIN, P. C. O. Nutrient leaching in an Ultisol cultivated with sugarcane. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 148, p. 141–149, jan. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.027>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377414003187?via%3Dihub>. Acesso em: 26 jun. 2019.

GHIBERTO, P. J.; LIBARDI, P. L.; BRITO, A. S.; TRIVELIN, P. C. O. Leaching of nutrients from a sugarcane crop growing on an Ultisol in Brazil. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 96, n. 10, p. 1443-1448, out. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.020>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377409001334?via%3Dihub>. Acesso em: 26 jun. 2019.

GLASZIOU, K.; BULL, T.; HATCH, M.; WHITEMAN, P. Physiology of sugar-cane vii. Effects of temperature, photoperiod duration, and diurnal and seasonal temperature changes on growth and ripening. **Australian Journal of Biological Sciences**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 53–66, jul. 1965. DOI: <https://doi.org/10.1071/bi9650053>. Disponível em: <https://www.publish.csiro.au/bi/BI9650053>. Acesso em: 26 jun. 2019.

GONCALVES, S. L.; SARAIVA, O. F.; FRANCHINI, J. C.; TORRES, E. **Decomposição de resíduos de milho e soja em função do tempo e do manejo do solo**. Londrina: Embrapa Soja, 2010. 20 p. (Embrapa Soja. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 3). Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/31179/1/Boletim-PD-3.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2019.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E.; **Processamento digital de imagens**. Tradução de Marcelo Vieira e Mauricio Escarpinati. 3. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010. 623 p.

GRIFFIN, T. S. Nitrogen availability. In: SCHEPERS, J.S.; RAUN, W.R. (ed.). **Nitrogen in agricultural systems**. Madison: American Society of Agronomy, 2008. 49 v. p. 613-646. (Agronomy Monograph). DOI: <https://doi.org/10.2134/agronmonogr49.c15>. Disponível em: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2134/agronmonogr49.c15>. Acesso em: 26 jun. 2019.

HUETE, A.; DIDAN, K.; Miura, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.] v. 83, n. 1-2, p. 195-213, nov. 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(02)00096-2). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425702000962>. Acesso em: 26 jun. 2019.

IBGE. Levantamento sistemático da produção agrícola (LSPA). In: IBGE. Rio de Janeiro, set. 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/lspa/tabelas>. Acesso em: 26 jun. 2019.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 92, n. 2-3, p. 185–202, jun. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.023>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378429005000304>. Acesso em: 26 jun. 2019.

INTERGOVERNMENTAL panel on climate change (2007): climate change 2007: mitigation of climate change: working group III contribution to the fourth assessment report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546013>. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2007-mitigation-of-climate-change/5D933BDDA2CFE3ECEFE477EA3F9D7948#fndtn-information>. Acesso em: 26 jun. 2019.

KORNDORFER, G. H.; COLOMBO, C. A.; CHIMELLO, M. A.; LEONI, P. L. C. Desempenho de variedades de cana-de-açúcar cultivadas com e sem nitrogênio. *In*: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 8., 2002, Recife. **Anais [...]**. Recife: STAB, 2002. p. 234-238.

KORNDÖRFER, G. H.; ANDERSON, D. L.; MUNDIM, V. C.; SIMÕES, M. S. Produção de adubos fluidos para cana-de-açúcar. **STAB**, Piracicaba, v. 14, n. 2, p. 25–29, nov./dez. 1995.

LANDELL, M. G. A.; BRESSIANI, J. A. Melhoramento genético, caracterização e manejo varietal. *In*: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. p. 101-155.

LANDELL, M. G. A.; PRADO, H.; VASCONCELOS, A. C. M.; PERECIN, D.; ROSSETO, R.; BIDOIA, M. A. P.; SILVA, M. A.; XAVIER, M. A. Oxisol subsurface chemical attributes related to sugarcane productivity. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 4, p. 741-745, out./dez. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0103-90162003000400020>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162003000400020&lng=en&tlng=en. Acesso em: 26 jun. 2019.

LARA-CABEZAS, W. A. R.; TREIVELIN, P. C. O.; KORNDORFER, G.; PEREIRA, G. H. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluída de cobertura na cultura de milho, em sistema de plantio direto no triângulo mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 363-476, abr./jun. 2000. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832000000200014>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832000000200014&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 26 jun. 2019.

MAGALHÃES, A. C. N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono da planta. *In*: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T. (coord.) **Ecofisiologia da produção**. Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa do Potássio e do Fósforo, 1987. p. 113-118.

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

MARIANO, E.; TRIVELIN, P. C. O.; VIEIRA, M. X.; LEITE, J. M.; OTTO, R.; FRANCO, H. C. J. Ammonia losses estimated by an open collector from urea applied to sugarcane straw. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 411-419, mar./abr. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832012000200010>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832012000200010&lng=en&tlng=en. Acesso em: 26 jun. 2020.

MASSRUHÁ, S. S. F. M.; LEITE, A. A. M. M. Agro 4.0: rumo à agricultura digital. *In*: MAGNONI JÚNIOR, L.; STEVENS, D.; SILVA, W. T. L. da; VALE, J. M. F.; PURINI, S. R. M.; MAGNONI, M. G. M.; SEBASTIÃO, E.; BRANCO JÚNIOR, G.; ADORNO FILHO, E. F.; FIGUEIREDO, W. S.; SEBASTIÃO, I. (org.). **JC na Escola**

Ciência, Tecnologia e Sociedade: mobilizar o conhecimento para alimentar o Brasil. 2. ed. São Paulo: Centro Paula Souza, 2017. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1073150>. Acesso em: 26 jun. 2019.

MELLO, F. F. C.; CERRI, C.E.P.; DAVIES, C.A.; HOLBROOK, N.M.; PAUSTIAN, K.; MAIA, S.M.F.; GALDOS, M.V.; BERNOUX, M.; CERRI, C.C. Payback time for soil carbon and sugar-cane ethanol. **Nature Climate Change**, [s. l.], v. 4, n. 7, p. 605–609, jun. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate2239>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nclimate2239#citeas>. Acesso em: 26 jun. 2019.

MONOSTORI, L. Cyber-physical production systems: roots, expectations and R&D challenges. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 17, p. 9–13, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.115>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114003497?via%3Dihub>. Acesso em: 26 jun. 2019.

MOZAMBANI, A. E.; PINTO, A. S.; SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M. História e morfologia da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. (org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: Livros Ceres, 2006. p. 11–18.

NASCIMENTO, J. P. R.; MADEIRA, H. M. F.; PEDRINI, H. Classificação de imagens utilizando descritores estatísticos de textura. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., Belo Horizonte, 2003. **Anais [...]**. Belo Horizonte, 2003. p. 2099-2106.

OTTO, R.; CASTRO, S. A. Q.; MARIANO, E.; CASTRO, S. G. Q.; FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen use efficiency for sugarcane-biofuel production: what is the next? **Bioenergy Research**, New York, v. 9, p. 1272–1289, jun. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-016-9763-x>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12155-016-9763-x>. Acesso em: 16 jun. 2019.

PAULY, M.; KEEGSTRA, K. Cell-wall carbohydrates and their modification as a resource for biofuels. **The Plant Journal**, [s. l.], v. 54, p. 559-568, fev. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-313x.2008.03463.x>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1365-313X.2008.03463.x>. Acesso em: 16 dez. 2019.

PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W. R. **Análise de imagens digitais: princípios, algoritmos e aplicações**. São Paulo: Thomson Learning, 2008.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 176 p. v. 1.

PRADO, H.; CAVALCANTE, E. P. Ambientes de produção de cana-de-açúcar de latossolos na região de Araxá-MG. **Nucleus**, Ituverava, v. 7, n. 2, p. 115-124, out. 2010. DOI: <https://doi.org/10.3738/nucleus.v7i2.353>. Disponível em: <http://www.nucleus.feituverava.com.br/index.php/nucleus/article/view/353>. Acesso em: 27 jun. 2019.

PRADO, R. M.; PANCELLI, M. Resposta de soqueiras de cana-de-açúcar em sistema de colheita sem queima à aplicação de nitrogênio. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 4, p. 951-959, out./dez. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0006-87052008000400018>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052008000400018&lng=pt&tln=pt. Acesso em: 27 jun. 2019.

ROBERTSON, F. A.; THORBURN, P. J. Management of sugarcane harvest residues: consequences for soil carbon and nitrogen. **Australian Journal of Soil Research**, [s. l.], v. 45, n. 1, p. 13-23, fev. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1071/sr06080>. Disponível em: <https://www.publish.csiro.au/sr/SR06080>. Acesso em: 27 jun. 2019.

ROBINSON, N.; BRACKIN, R.; VINALL, K.; SOPER, F.; HOLST, J.; GAMAGE, H.; LONHIENNE, C. P.; RENNENBERG, H.; LAKSHMANAN, P.; SCHMIDT, S. Nitrate paradigm does not hold up for sugarcane. **PloS one**, San Francisco; Cambridge, v. 6, n. 4, p. e19045, abr. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019045>. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0019045>. Acesso em: 27 jun. 2019.

SANTOS, A. P. O. **Desenvolvimento de descritores de imagem para reconhecimento de padrões de plantas invasoras (folhas largas e folhas estreitas)**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/416>. Acesso em: 27 jun. 2019.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. **Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar**. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. (org.). Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 19-38.

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

SIMÕES, M.; SOLER, L.; PY, H. Tecnologias a serviço da sustentabilidade e da agricultura. Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, v. 43, n. 2, p. 49-53, maio/ago. 2017. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/167339/1/2017-044.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2019.

SINGH, P.; SUMAN, A.; TIWARI, P.; ARYA, N.; GAUR, A.; SHRIVASTAVA, A.K. Biological pretreatment of sugarcane trash for its conversion to fermentable sugars. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, [s. l.], v. 24, n. 4, p. 667-673, ago. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-007-9522-4>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11274-007-9522-4>. Acesso em: 27 jun. 2019.

SWAIN, P. H.; DAVIS, S. M. **Remote sensing**: the quantitative approach. New York: McGraw-Hill, 1978. 396 p.

TASSO JUNIOR, L. C.; MARQUES, M. O.; CAMILOTTI, F.; SILVA, T. Extração de macronutrientes em cinco variedades de cana-de-açúcar cultivadas na região centro-norte do Estado de São Paulo. **STAB**, Piracicaba, v. 25, n. 6, p. 38-42, jul./ago. 2007. Disponível em: <http://177.103.158.171/site/pdf/25.6.2.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2019.

TAVARES, O. C. H.; LIMA, E.; ZONTA, E. Crescimento e produtividade da cana planta cultivada em diferentes sistemas de preparo do solo e de colheita. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 32, n. 1, p. 61-68, 2010. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v32i1.2051>. Disponível em: <http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/2051>. Acesso em: 27 jun. 2019.

THORBURN, P. J.; MEIER, E. A.; PROBERT, M. E. Modelling nitrogen dynamics in sugarcane systems: Recent advances and applications. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 92, n. 2-3, p. 337- 351, jun. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.016>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378429005000407?via%3Dihub>. Acesso em: 27 jun. 2019.

TRIVELIN, P. C. O., FRANCO, H. C. J., OTTO, R., FERREIRA, D. A., VITTI, A. C., FORTES, C., FARONI, C. E., OLIVEIRA, E. C. A., CANTARELLA, H. Impact of sugarcane trash on fertilizer requirements for São Paulo, Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, n. 5, p. 345-352, set./out. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0103-90162013000500009>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162013000500009&lng=en&tlng=en. Acesso em 27 jun. 2019.

TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C.; OLIVEIRA, M. W.; GAVA, G. J. C.; SARRIÉS, G.A. Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana-planta) em solo arenoso com incorporação de resíduo da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 637-646, jul./set. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832002000300008>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832002000300008&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 27 jun. 2019.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Agricultural Statistics Board. Crop production**, 2019. Disponível em: https://www.nass.usda.gov/Education_and_Outreach/Reports,_Presentations_and_Conferences/reports/Census-Sub-Sampling-Method-Report.pdf. Acesso em: 5 nov. 2019.

VITTI, A.C.; TRIVELIN, P. C. O.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; FARONI, C. E.; CANTARELLA, H. Recuperação pela cana-de-açúcar do N dos resíduos culturais e da adubação nitrogenada de plantio. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 9., 2008, Maceió. **Anais** [...]. Maceió: STAB, 2008.

VITTI, A.C.; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. C.; FRANCO, H. C. J.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada à localização de adubos nitrogenados aplicados sobre os resíduos culturais em canavial sem queima. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 491-498, maio/jun. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-06832007000300009>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832007000300009&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 26 jun. 2019.

CAPÍTULO II

RESUMO

SILVEIRA, LUIZ HENRIQUE. **Eficiência de fontes líquidas de nitrogênio para a soqueira de cana-de-açúcar**. Uberlândia: UFU, 2020. 62 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

Sendo o nitrogênio (N) um nutriente essencial ao desenvolvimento das plantas, objetivou-se com este trabalho avaliar a eficiência de fontes líquidas de N, no desenvolvimento e na produtividade da soqueira da cana-de-açúcar em duas safras agrícolas – 2017/2018 e 2018/2019 (duas soqueiras). Para isto, foram instalados três experimentos em áreas de produção das usinas COFCO *International*, Usina Açucareira Guaíra e Usina São Francisco. Nos três experimentos foram testadas cinco fontes de N: Ucan (23% N + 4% Ca), Uran (32% N), Nitran (20% N), 20-00-00 + 4% Mg + 1% de Ca e Ureia líquida (20% N), na dose de 100 kg ha⁻¹ de N. Os fertilizantes Ucan e Uran também foram testados nas doses de 33, 66 e 125 kg ha⁻¹ de N, além do tratamento testemunha sem N. As parcelas experimentais foram constituídas por 5 linhas de cana-de-açúcar com 10 m de comprimento e espaçadas 1,5 m entre si. A área de cultivo de cada parcela foi de 75 m². A aplicação dos fertilizantes foi realizada com pulverizador costal e cilindro pressurizado à CO₂, sendo aplicação direcionada ao solo, na linha de brotação da soqueira. Cerca de 90 dias após a aplicação avaliou-se o número de perfilho por metro, bem como amostras de folha foram coletadas para a determinação dos teores de cálcio (Ca) e N. Aproximadamente 250 dias após aplicação, realizou-se a colheita das parcelas experimentais, afim de determinar a produtividade de colmos (TCH). Também foram realizadas análises de qualidade da matéria-prima, determinando o pol (%) da cana-de-açúcar e o açúcar total recuperável (kg t⁻¹), sendo este último utilizado para determinar a produtividade de açúcar por hectare (TAH). Com os resultados de TCH e TAH, realizou-se o cálculo do índice de eficiência agronômica (IEA) das fontes Ucan, Nitram, 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca e Ureia líquida, sendo observado que a fonte Ureia líquida apresentou o menor índice em todos experimentos, independente da variável analisada (TCH e TAH). De modo geral, fontes de N líquidas testadas resultaram em índices de eficiência agronômica superior à fonte Uran aplicada na dose de 100 kg ha⁻¹ de N.

CHAPTER II

ABSTRACT

SILVEIRA, LUIZ HENRIQUE. Efficiency of liquid nitrogen sources for sugarcane soqueira. Uberlândia: UFU, 2020. 62p. Dissertation (Master in Agronomy/Soils – Federal University of Uberlândia).

The nitrogen (N) a nutrient essential to the development of plants, the objective of this work was to evaluate the efficiency of net sources of N, in the development and productivity of sugarcane ratoon in two agricultural crops - 2017/2018 and 2018/2019 (two ratoons). For this, three experiments were installed in the production áreas of the COFCO International plants, Guaíra Sugar Mill and São Francisco Power Plant. In the three experiments, five sources of N were tested: Ucan (23% N + 4% Ca), Uran (32% N), Nitran (20% N), 20-00-00 + 4% Mg + 1% of Ca and liquid Urea (20% N), At the dose of 100 kg ha⁻¹ N. The fertilizers Ucan and Uran were also tested at doses of 33, 66 and 125 kg ha⁻¹ of N, beyond the control treatment without N. The experimental plots were composed by 5 rows of sugar cane with 10 m in length and spaced 1.5 m apart from each other. The growing area of each plot was 75 m². The fertilizers were applied with a costal spray and pressurized cylinder to CO₂, and it was application direct to the soil, n the line of the stump sprouting. About 90 days after the application, the number of profiled per meter was evaluated, and leaf samples were collected for the determination of the calcium (Ca) and N contents, as well as flight with remotely manned aircraft (ARP - Sensix SX2) embarked with multispectral sensor (Micasense). Approximately 250 days after application, the harvest of the experimental plots, in order to determine the productivity of stalks (TCH). Quality analyses of the raw material were also carried out, determining the sugar cane pol (%) and total recoverable sugar (kg t⁻¹), the latter being used to determine the sugar yield per hectare (TAH). With the results of TCH and TAH, the calculation of the agronomic efficiency index (AEI) from Ucan sources was performed, Nitram, 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca and liquid Urea líquida, being observed that the source liquid Urea showed the lowest index in all experiments, Independent of the variable analyzed (TCH AND TAH). In general, liquid nitrogen sources tested resulted in indices of agronomic efficiency higher than the source Uran applied at a dose of 100 kg ha⁻¹ N.

1 INTRODUÇÃO

O nitrogênio (N) é um elemento indispensável para a formação das plantas, considerado um importante componente da produção agrícola, uma vez que influencia a taxa de emergência e expansão da área foliar além de ser constituinte de proteínas, citocromos, clorofila e outros. Sendo assim, sua disponibilidade para as plantas é fundamental para continuidade da vida no planeta, devendo estar prontamente disponível para as plantas.

O N é um dos nutrientes mais limitantes para os cultivos agrícolas, especialmente por se tratar do elemento mais exigido e extraído pelas plantas cultivadas. Desta forma, grandes quantidades de fertilizantes nitrogenados são exigidas para se obter maiores produtividades. No ano de 2018 foram entregues 9,2 milhões de toneladas de fertilizantes nitrogenados ao mercado, destes 61% na forma de ureia (também em solução aquosa, com teor de nitrogênio (azoto) superior a 45 %), 25% na forma de sulfato de amônio, 11% na forma de nitrato de amônio e 3% na forma de amônio (BRASIL, 2019).

As exigências de N pela cultura da cana-de-açúcar são elevadas, e dependem da produtividade alcançada, sendo que de modo geral as produtividades variam de 80-180 t ha⁻¹ e as doses variando entre 112 a 280 kg ha⁻¹. Trivelin (2002) relata a necessidade da disponibilidade de N no solo para que maiores produtividades sejam alcançadas na soqueira da cana-de-açúcar.

Todavia, fertilizantes nitrogenados apresentam custos elevados de produção e formulação além de serem passíveis de perdas por volatilização, lixiviação e/ou mobilização (KRISTENSEN, 2004). Dentre outros motivos, fertilizantes apresentam elevado impacto sobre os custos de produção, sendo calculados em torno de 20 a 25% do total gasto (ESPERANCINI et al., 2015). Vitti et al. (2007) afirmam que os fertilizantes nitrogenados aplicados ao solo passam por uma série de transformações químicas e microbianas, podendo resultar em perdas devido à sua alta mobilidade no sistema solo-planta.

Com a finalidade de evitar que perdas ocorram deve-se adotar estratégias para elevar a eficiência da adubação nitrogenada, tais como a localização do adubo na região mais ativa do sistema radicular e sua aplicação em estádios fenológicos de maior demanda, sempre aliado às condições hídricas adequadas (LARA-CABEZAS, 2000). A indústria sempre busca alternativas que elevem a eficiência da adubação, desenvolvendo

fontes alternativas menos propensas a perdas, seja pela inibição da urease, pela forma que o N se apresenta (amônio em grânulo) ou até mesmo na forma de fertilizantes líquidos, que possuem maior facilidade em penetrar no solo e serem absorvidos pela planta (MARCHESAN et al., 2011).

A utilização de fertilizantes líquidos é datada em 1840 quando na Irlanda onde fluidos inorgânicos eram comercializados. No Brasil, em meados de 1920 se iniciavam as pesquisas, porém, somente em 1970 iniciou-se a comercialização de misturas sólidas e líquidas para aplicação foliar. Em 1979 teve início à produção industrial de suspensões e a partir daí, estudos de diversas formulações de fertilizantes líquidos se iniciaram (INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION, 1992). Neste sentido, objetivou-se avaliar a eficiência de fontes líquidas de N, no desenvolvimento e na produtividade da cultura da cana-de-açúcar no ciclo da soqueira, em dois anos de aplicação e avaliação.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Com a finalidade de testar fontes e doses de N, foram instalados três experimentos de campo, sendo estes conduzidos em unidades produtoras de cana-de-açúcar: Usina COFCO *International*, Usina Açucareira Guaíra e Usina São Francisco, localizados nos municípios de Sebastianópolis do Sul/SP, Guaíra/SP e Quirinópolis/GO respectivamente, tendo duração de duas safras agrícolas (2017/2018 e 2018/2019). Utilizou-se delineamento experimental em blocos casualizados (DBC) com quatro repetições. Assim, foram avaliadas diferentes fontes líquidas e doses de N, bem como, para fins de comparação, um tratamento testemunha sem a aplicação desse nutriente. Os produtos e as doses utilizadas são apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Doses e produtos utilizados em cada tratamento

| Tratamentos | | Dose de N (kg ha ⁻¹) |
|--------------------------|--------|---|
| Testemunha | | 0 |
| Ucan | 23-0-0 | 33 + 6 ^{**} |
| Ucan | | 66 + 12 ^{**} |
| Ucan | | 100 + 18 ^{**} |
| Ucan | | 133 + 24 ^{**} |
| Uran | 32-0-0 | 33 |
| Uran | | 66 |
| Uran | | 100 |
| Uran | | 133 |
| Nitram | 20-0-0 | 100 |
| 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca | | 100 + 20 [*] + 5 ^{**} |
| Ureia líquida | 20-0-0 | 100 |

(*) Dose de Mg aplicada em kg ha⁻¹.

(**) Dose de Ca aplicada em kg ha⁻¹.

Todos os tratamentos receberam o equivalente a 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 140 kg ha⁻¹ de K₂O, via Superfosfato Triplo (SFT) e Cloreto de Potássio (KCl) respectivamente.

As parcelas experimentais foram constituídas por 5 linhas de cana-de-açúcar com 10 m de comprimento e espaçadas 1,5 m entre si (Figura 1). A área de cultivo de cada parcela foi de 75 m², sendo que, entre cada uma das parcelas, adotou-se ainda um espaçamento de 3 m nas cabeceiras (Figura 2).

As características químicas do solo em que os experimentos foram instalados estão descritas nas tabelas a seguir (Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4).



Figura 1. Parcela experimental constituída por 5 linhas de cana-de-açúcar com 10 m de comprimento e espaçadas 1,5 m entre si



Figura 2. Imagem aérea da área de instalação do experimento

Tabela 2. Caracterização química do solo da área de instalação do experimento (Usina COFCO *International*, fazenda Guarani, Sebastianópolis - SP, instalação em dezembro/2017)

| pH | MO | Ca | Mg | Al | P | K | S | Cu | Fe | Mn | Zn | B |
|-------------------|----------------------|---|-----|-----|-------|------|-----|---------------------------|------|------|-----|-----|
| CaCl ₂ | dag dm ⁻³ | ---- cmol _c dm ⁻³ --- | | | ----- | | | mg dm ⁻³ ----- | | | | |
| 5,5 | 2,1 | 2,0 | 1,3 | 0,0 | 34,3 | 73,0 | 4,0 | 0,9 | 36,0 | 20,1 | 2,0 | 0,2 |

pH: CaCl₂; MO: K₂Cr₂O₇; Ca, Mg e Al: KCl 1 mol L⁻¹; P: Resina; K: Mehlich-1; S: carvão ativado; Cu, Fe, Mn e Zn: DTPA; B: BaCl₂ (SILVA, 2009).

Tabela 3. Caracterização química do solo da área de instalação do experimento (Usina Guaíra, fazenda Capão da Onça, talhão 10, Guaíra - SP, instalação em janeiro/2018)

| pH | MO | Ca | Mg | Al | P | K | S | Cu | Fe | Mn | Zn | B |
|------|----------------------|------|---|---------------------------------|----|----|---|-----|----|----|-----|-----|
| CaCl | dag dm ⁻³ | ---- | cmol _c dm ⁻³ ---- | ----- mg dm ⁻³ ----- | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | |
| 5,3 | 4,2 | 4,0 | 1,0 | 0,0 | 24 | 32 | 9 | 3,9 | 14 | 32 | 1,2 | 0,3 |
| | | | | 2 | | | | | | | | |

pH: CaCl₂; MO: K₂Cr₂O₇; Ca, Mg e Al: KCl 1 mol L⁻¹; P: Resina; K: Mehlich-1; S: carvão ativado; Cu, Fe, Mn e Zn: DTPA; B: BaCl₂ (SILVA, 2009).

Tabela 4. Caracterização química do solo da área de instalação do experimento (Usina São Francisco, fazenda Bela Vista – Sete Lagoas, Quirinópolis – GO, instalação em janeiro/2018)

| pH | MO | Ca | Mg | Al | P | K | S | Cu | Fe | Mn | Zn | B |
|------|----------------------|------|---|---------------------------------|-----|----|---|-----|----|------|-----|-----|
| CaCl | dag dm ⁻³ | ---- | cmol _c dm ⁻³ ---- | ----- mg dm ⁻³ ----- | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | |
| 4,3 | 3,4 | 0,9 | 0,6 | 0,4 | 8,4 | 53 | 6 | 2,4 | 20 | 18,5 | 0,2 | 0,2 |

pH: CaCl₂; MO: K₂Cr₂O₇; Ca, Mg e Al: KCl 1 mol L⁻¹; P: Resina; K: Mehlich-1; S: carvão ativado; Cu, Fe, Mn e Zn: DTPA; B: BaCl₂ (SILVA, 2009).

Os tratamentos foram aplicados via solo, após o 2º e 3º corte da cana-de-açúcar, para isto, utilizou-se pulverizador costal e cilindro pressurizado a CO₂, cuja pulverização foi realizada de forma direcionada ao solo, na linha de brotação da soqueira (Figura 3).



Figura 3. Aplicação da fonte líquida de N em jato dirigido ao solo

Para o experimento na Usina COFCO *International* utilizou-se a variedade CTC 9001, a qual apresenta boa adaptabilidade à colheita mecanizada, elevado açúcar total recuperável e precocidade em ambiente restritivo (CTC, 2018). Na Usina Açucareira

Guaíra, utilizou-se a variedade IAC 91-1099, a qual apresenta ótima brotação de soqueiras, excelente fechamento de entrelinhas e é indicada para ambientes médio-favoráveis (SOCICANA, 2012). Enquanto na Usina São Francisco utilizou-se a variedade CTC 4, a qual apresenta elevada produtividade, boa adaptabilidade ao plantio mecanizado e excelente perfilhamento (CTC, 2018).

14 Descrição das fontes

As fontes testadas possuem variadas formulações, tais quais:

- Ucan: Nitrato de cálcio; Nitrato de amônio; Ureia. (23% N)
- Uran: Nitrato de amônio; Ureia. (32% N)
- Nitram: Nitrato de amônio. (20% N)
- Ureia líquida: Ureia. (20% N)
- 20-00-00+4% Mg+1%Ca: Nitrato de cálcio; Nitrato de magnésio; Ureia. (20% N)

Fonte: Yara Brasil, 2019

15 Avaliações

As avaliações foram realizadas de acordo com o calendário pré-estabelecido e a disponibilidade de cada usina em receber a equipe de trabalho, conforme descrito a seguir.

1. Perfilhos por metro

Na usina COFCO *International*, aos 90 dias após a aplicação (DAA) do primeiro ano de avaliação e aos 104 DAA do segundo ano (155 dias após o 2º corte – DAC). Na Usina Açucareira Guaíra, a avaliação ocorreu aos 105 dias após a aplicação (DAA) (abril/2018) do primeiro ano (março/2018) e aos 70 DAA do segundo ano (fevereiro/2019) (137 dias após o corte anterior – DAC). E na usina São Francisco, a avaliação ocorreu aos 104 dias após a aplicação (DAA) do primeiro ano (abril/2018) e aos 98 DAA do segundo ano (fevereiro/2019) (192 dias após o 2º corte – DAC). Nas três usinas avaliou-se o número de perfilhos presentes nas três linhas centrais de cada parcela.

Posteriormente os resultados foram padronizados em números de perfilhos por metro linear, sendo este número obtido através da razão do número total de perfilhos pelo total de metros avaliados em cada parcela experimental.

2.

Falha de brotação

Nas mesmas datas de avaliações do perfilhamento, nas três linhas centrais de cada parcela, realizou-se a mensuração manual das falhas de brotação, seguindo metodologia proposta por Stolf (1986), que consiste na medição de falhas de brotação acima de 50 cm ao longo da linha, obtendo-se um índice em porcentagem para cada parcela, conforme equação abaixo:

Equação 1:

$$\% \text{ de falhas} = \frac{[(\sum \text{valor medido}) - (\text{número de falhas} \times 0,50)]}{n^{\circ} \text{ de metros lineares avaliados}} \times 100$$

3.

Análise foliar

Afim de avaliar os teores de N e Ca, nas mesmas datas das avaliações de perfilhamento f realizou-se coletas de amostras de folhas, seguindo a metodologia proposta por Silva (2009). Desta forma, foram coletadas duas folhas (TVD – *Top Visible Dewlap*) de cada uma das 5 linhas da parcela, totalizando 10 folhas. A TVD é por definição a primeira folha com a lígula visível, sendo levadas ao laboratório apenas o terço médio sem a nervura central.

4.

Produtividade

Aos 238 e 222 DAA (273 DAC) (agosto/2018 e maio/2019), na Usina COFCO *International* realizou-se a colheita mecanizada da cana-de-açúcar das três linhas centrais de cada parcela, totalizando 30 metros lineares por parcela (45 m²). A pesagem da cana-de-açúcar foi realizada com um caminhão equipado com balança de célula de (Figura 4), determinando-se assim o peso de cada uma das linhas avaliadas.



Figura 4. Pesagem da cana-de-açúcar colhida com o auxílio de uma célula de carga acoplada a um transbordo – Usina COFCO *International* (Sebastianópolis/SP)

Aos 271 e 329 (396 DAC) (outubro/2018 e novembro/2019), na Usina Açucareira Guaíra realizou-se a colheita manual da cana-de-açúcar das três linhas centrais de cada parcela, totalizando 30 metros lineares por parcela (45 m²). Após o desponte e a retirada do excesso de palha, a pesagem da cana colhida foi realizada com o auxílio de uma balança acoplada a uma carregadeira (Figura 5).



Figura 5. Pesagem da cana-de-açúcar colhida com o auxílio de uma balança acoplada à uma carregadeira – Usina Açucareira Guaíra (Guaíra/SP)

Aos 217 e aos 258 DAA (352 DAC) (agosto/2018 e agosto/2019), na Usina São Francisco realizou-se a colheita manual da cana-de-açúcar de 3 metros lineares (sem falha de brotação) das três linhas centrais de cada parcela, totalizando 9 metros lineares por parcela experimental (13,5 m²). Após o desponte e a retirada do excesso de palha, a pesagem da cana colhida foi realizada com o auxílio de uma balança acoplada a um tripé de sustentação (Figura 6).



Figura 6. Pesagem da cana-de-açúcar colhida com o auxílio de uma balança acoplada à um tripé de sustentação – Usina São Francisco (Quirinópolis/GO).

A produtividade foi determinada convertendo os pesos obtidos para t ha⁻¹, sendo que, para a obtenção dos valores de tonelada de colmos por hectare (TCH), as porcentagens de falhas de cada parcela foram consideradas, conforme equação abaixo:

$$\text{Equação 2: } TCH (t ha^{-1}) = \frac{TCH \text{ obtido} \times 100}{100 - \% \text{ de falhas}}$$

5. Qualidade matéria-prima

Para a realização das análises de qualidade da matéria-prima, foram amostrados, aleatoriamente antes de ambas as colheitas, 2 colmos por linha, sendo amostrados

aleatoriamente. Em seguida, os materiais obtidos foram submetidos à análise tecnológica no laboratório da unidade produtora, seguindo metodologia proposta por CONSECAN (2006). Determinou-se o pol da cana (%) e o açúcar total recuperável (ATR em kg t⁻¹), sendo este último usado também para o cálculo da produção de açúcar por hectare (TAH em t ha⁻¹), multiplicando-o pelo TCH.

6. Índice de eficiência agrônômica (IEA)

Com os valores de TCH e TAH acumulados após os dois cortes (somatório das produtividades do 2º e do 3º corte), calculou-se o índice de eficiência agrônômica (IEA) das fontes Ucan, Nitram, 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca e Ureia líquida na dose de 100 kg ha⁻¹ de N, em relação à fonte Uran, conforme a equação abaixo:

$$\text{Equação 3: IEA (\%)} = \frac{\text{TCH acumulado da fonte} - \text{TCH testemunha}}{\text{TCH acumulado Uran} - \text{TCH testemunha}} \times 100$$

A comparação com o Uran se deu pelo fato de ser amplamente utilizado nas lavouras brasileiras (PROCHNOW e ABDALLA, 2008). Ele é um fertilizante líquido nitrogenado não pressurizado, ou seja, não apresenta pressão de vapor significativa em temperatura ambiente, o que reduz perdas por volatilização e torna o manuseio deste material mais seguro. Ele é obtido a partir da dissolução quente entre ureia e nitrato de amônio (BAUMBARTNER; SEMPIONATO, 1999). O Uran é um produto tem boa aceitação no mercado, pois apresenta N em três formas assimiláveis pela planta (amídica, nítrica e amoniacal). Considerando 32% de N, destes 14% se encontram na forma amídica, 9% na forma amoniacal e 9% na forma nítrica.

No Brasil, Uran ganhou destaque nas culturas da cana-de-açúcar, citros e café, principalmente no estado de São Paulo. Em nível global, os Estados Unidos foram pioneiros na sua fabricação e utilização, sendo atualmente os maiores consumidores desta fonte líquida de N. Na América Latina, a Argentina apresenta-se como maior consumidora sendo seguida pelo Uruguai (MELGAR; DUGGAN, 2014).

7. Análise estatística

As médias dos tratamentos foram submetidas à análise de variância utilizando-se o programa SISVAR versão 5.3 (FERREIRA, 2014). Em seguida, compararam-se as médias pelo teste de Scott-Knott, a 0,10 de significância (fontes de N na dose de 100 kg ha⁻¹ de N), bem como análise de regressão para as doses de Uran e Ucan com o auxílio

dos programas SISVAR versão 5.3 (FERREIRA, 2014) e SigmaPlot 11.2 edição (SYSTAT SOFTWARE, 2009), a 0,10 de significância.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

16 Perfis por metro

No primeiro ano de avaliações, não houve diferença estatística no perfilhamento da cana-de-açúcar com a utilização das fontes líquidas, na dose de 100 kg ha^{-1} , no experimento conduzido na Usina COFCO (Tabela 5), obtendo-se perfilhamento médio de 22,9 e 14,9 no primeiro e no segundo ano, respectivamente. No segundo ano de avaliações, nesta mesma usina, as fontes nitrogenadas resultaram em maior número de perfilho de cana-de-açúcar por metro linear quando comparadas à testemunha, com acréscimo de até 3,2 perfilhos m^{-1} , cujos melhores resultados foram obtidos com as fontes Nitram, Uran e Ucan (Tabela 5).

Na Usina Açucareira Guaíra, não foram observadas diferenças no perfilhamento da cana-de-açúcar em dois anos de aplicação das diferentes fontes líquidas de N na dose de 100 kg ha^{-1} de N (Tabela 5). Entretanto, pode-se ressaltar que acréscimos de até aproximadamente 3 perfilhos m^{-1} foram obtidos, cujos melhores resultados foram observados com as fontes Uran e Nitram após o 2º e 3º cortes, respectivamente (Tabela 5).

Na Usina São Francisco, após o primeiro ano de aplicação das fontes líquidas (2º corte), acréscimos no número de perfilhos por metro linear foram obtidos somente com a fonte Ucan, com aproximadamente 3 perfilhos m^{-1} a mais que o tratamento controle (Tabela 5). Após o segundo ano utilizando-se as fontes (3º corte), apesar de não serem observadas diferenças entre os tratamentos, acréscimos de até aproximadamente 4 perfilhos m^{-1} foram obtidos com as fontes nitrogenadas, cujos melhores resultados foram obtidos com a fonte 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca (Tabela 5).

Tabela 5. Número de perfilhos por metro linear da cana-de-açúcar (2º e 3º cortes, variedade CTC 9001, Usina COFCO, faz. Guarani, Sebastianópolis do Sul – SP, variedade IAC 91-1099. Usina Guaíra, faz. Capão da Onça, Guaíra – SP, variedade CTC 4. Usina São Francisco, faz. Bela Vista – Sete Lagoas, Quirinópolis - GO após dois anos de aplicação de diferentes fontes líquidas de N na soqueira.

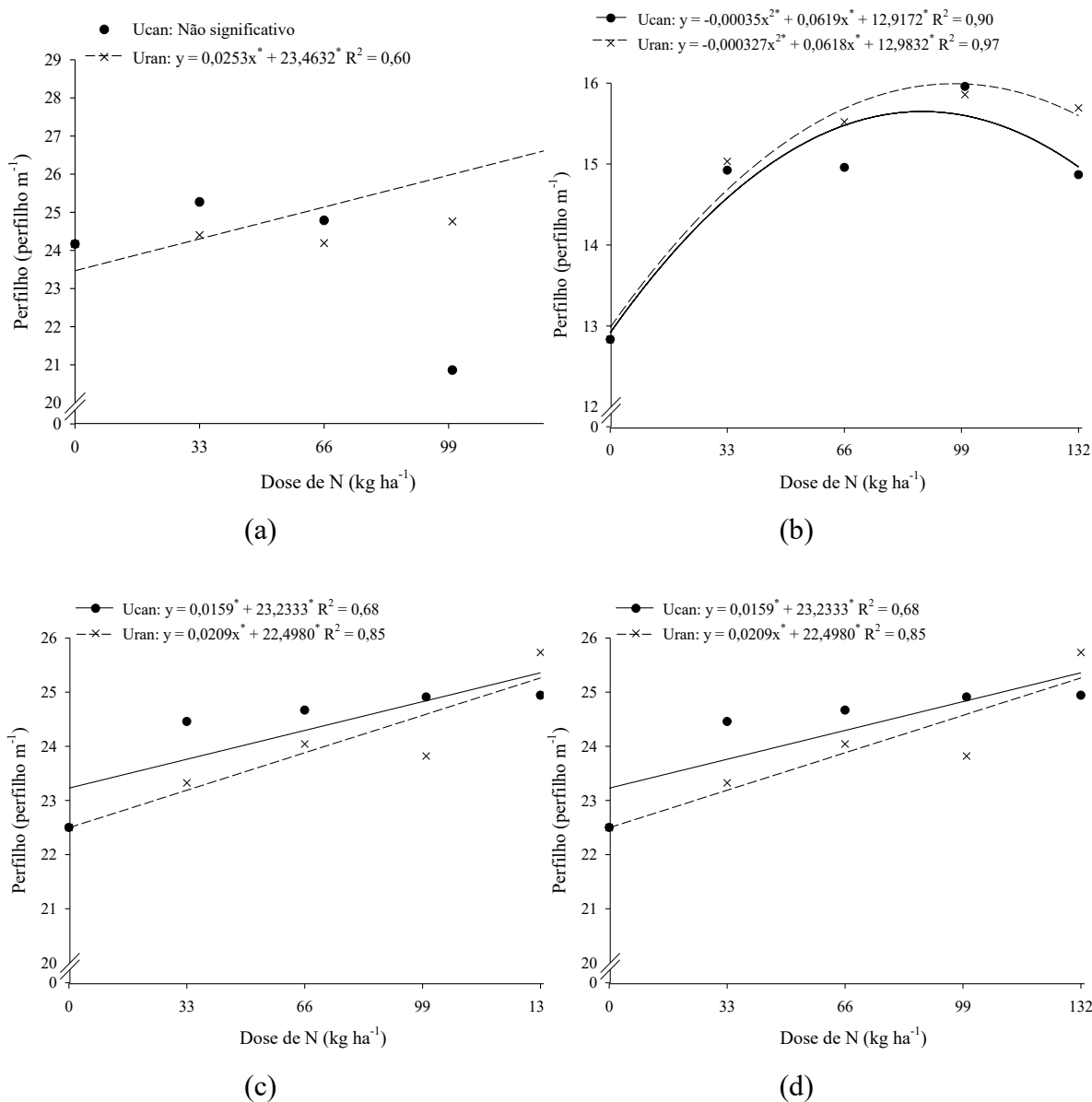
| Tratamento | Dose de N (kg ha ⁻¹) | Perfilhos (perfilho m ⁻¹) | |
|---|-------------------------------------|---------------------------------------|----------|
| | | 2º corte | 3º corte |
| COFCO <i>International</i> | | | |
| Testemunha | 0 | 24,2 a | 12,8 c |
| Ucan | 100 | 20,9 a | 16,0 a |
| Uran | 100 | 24,8 a | 15,9 a |
| Nitram | 100 | 23,0 a | 15,4 a |
| 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca | 100 | 23,2 a | 14,9 b |
| Ureia líquida | 100 | 23,7 a | 14,7 b |
| Média | | 22,9 | 14,9 |
| 2º corte: CV: 5,8%. 3º corte: CV: 4,0% | | | |
| Usina Açucareira Guaíra | | | |
| Testemunha | 0 | 17,9 a | 22,5 a |
| Ucan | 100 | 19,5 a | 24,9 a |
| Uran | 100 | 20,5 a | 23,8 a |
| Nitram | 100 | 19,2 a | 25,1 a |
| 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca | 100 | 18,5 a | 24,0 a |
| Ureia líquida | 100 | 19,7 a | 24,2 a |
| Média | | 19,6 | 24,1 |
| 2º corte: CV: 10,8%. 3º corte: CV: 7,8% | | | |
| Usina São Francisco | | | |
| Testemunha | 0 | 24,8 b | 13,5 a |
| Ucan | 100 | 27,7 a | 15,5 a |
| Uran | 100 | 21,2 c | 15,5 a |
| Nitram | 100 | 20,8 c | 15,7 a |
| 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca | 100 | 19,8 c | 17,1 a |
| Ureia líquida | 100 | 21,1 c | 14,8 a |
| Média | | 22,6 | 15,4 |
| 2º corte: CV: 3,9%. 3º corte: CV: 10,8% | | | |

Médias seguidas por letras distintas na coluna são diferentes pelo teste de Scott-Knott a 0,10 de significância.

No primeiro ano de avaliação (2º corte) das doses crescentes de Uran na Usina COFCO, nota-se acréscimos lineares no número de perfilhos por metro linear de cana-de-açúcar, sendo que a cada 100 kg ha⁻¹ de N adicionados através desta fonte, 2,5 perfilhos m⁻¹ são obtidos (Figura 7a). Por outro lado, não foi obtido ajuste significativo para as doses crescentes de Ucan (Figura 7a).

No segundo ano de avaliação (3º corte), nesta mesma usina, modelos polinomiais quadráticos foram obtidos, cujos melhores resultados seriam observados

com a aplicação de Uran e Ucan na dose de aproximadamente 90 kg ha⁻¹ de N (ponto de máximo) (Figura 7b).



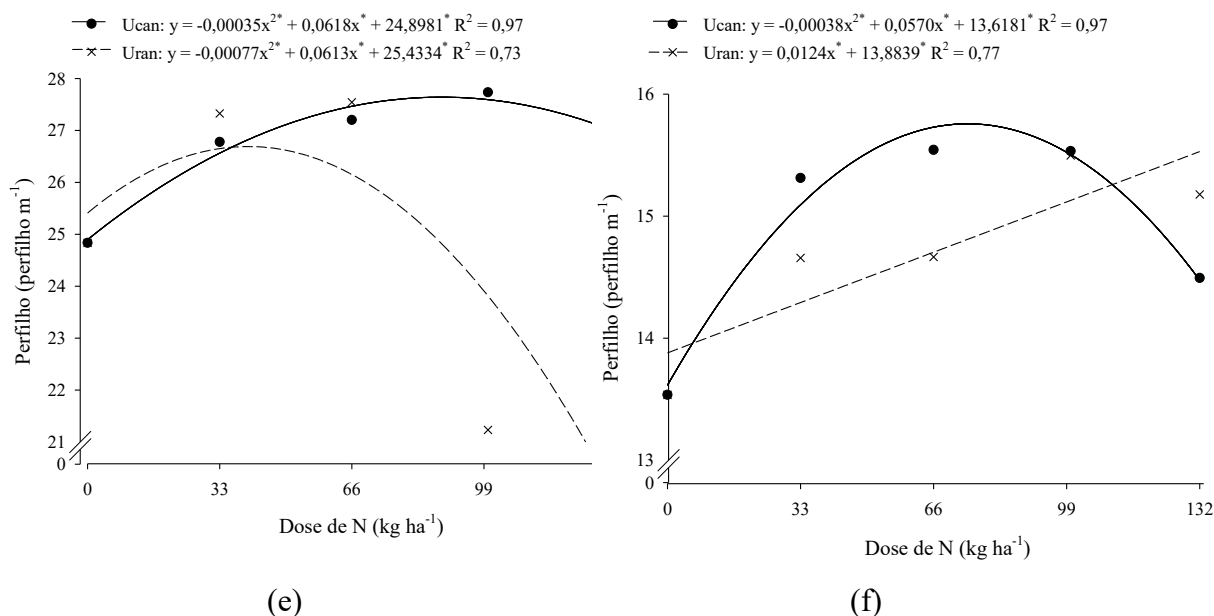


Figura 7. Número de perfilhos por metro linear após o primeiro (a,c,e) e segundo (b,d,f) ano de aplicação de doses crescentes de N através das fontes Ucan e de Uran (2º e 3º cortes, variedade CTC 9001, Usina COFCO (a,b), faz. Guarani, Sebastianópolis – SP, contagem em março/18 e janeiro/2019, aos 90 e 104 DAA, respectivamente; 2º e 3º cortes, variedade IAC 91-1099, Usina Guaíra (c,d), faz. Capão da Onça, Guaíra – SP, contagem em abril/18 e fevereiro/2019, aos 105 e 70 DAA, respectivamente; 2º e 3º corte, variedade CTC 4, Usina São Francisco (e,f), faz. Bela Vista – Sete Lagoas, Quirinópolis – GO, contagem em abril/18 e fevereiro/2019, aos 104 e 98 DAA, respectivamente)

A aplicação de doses crescentes de Ucan na Usina Açucareira Guaíra, em soqueira de 2º corte (primeiro ano do experimento) resultou em aumentos lineares no número de perfilhos por metro, com acréscimos de 2,0 perfilhos a cada 100 kg ha⁻¹ de N adicionados através desta fonte (Figura 7c). Quanto à aplicação das doses crescentes de Uran, ajuste polinomial quadrático foi obtido, sendo que, de modo geral, maior perfilhamento seria observado com a utilização desta fonte na dose de 64,0 kg ha⁻¹ de N (ponto de máximo) (Figura 7c).

No segundo ano de experimento nesta mesma usina, aumentos lineares no número de perfilhos foram obtidos com a aplicação de doses crescentes de ambas as fontes com acréscimos de aproximadamente de 2,0 perfilhos a cada 100 kg ha⁻¹ de N (Figura 7d).

Foram obtidos modelos polinomiais quadráticos nas avaliações da Usina São Francisco, de modo que no perfilhamento da cana-de-açúcar foram obtidos com a aplicação de doses crescentes de Ucan, cujos melhores resultados seriam obtidos com a

aplicação de 88 e 75 kg ha⁻¹ de N no primeiro e no segundo ano de aplicação, respectivamente (ponto máximo das curvas) (Figura 7e,f). Por outro lado, as doses crescentes de Uran no primeiro ano de experimento (2º corte) resultaram em ajuste polinomial quadrático, sendo que, de modo geral, maior perfilhamento seria obtido com a utilização desta fonte na dose de 40 kg ha⁻¹ de N (ponto máximo da curva) (Figura 7e), enquanto que, no segundo ano de experimento (3º corte), acréscimos lineares de 1,2 perfilhos m⁻¹ são obtidos a cada 100 kg ha⁻¹ de N adicionados através desta fonte (Figura 7f).

O perfilhamento da cana-de-açúcar é característica varietal (CASAGRANDE, 1991; CASTRO, CHRISTOFFOLETTI, 2005), sendo dependente de diversos fatores externos, como clima, idade do canavial, adubação, sendo que a maioria dos pesquisadores citam que os elementos mais importantes para o perfilhamento são o nitrogênio e fósforo (MANHÃES et al., 2015), todavia, este processo fisiológico é regulado pela auxina, que é sintetizada na gema apical da planta e induz a elongação de tecidos, inibindo a emergência das gemas laterais através de sua dominância apical (CASAGRANDE, 1991; CASTRO, CHRISTOFFOLETTI, 2005). Weber et al. (2004) observaram resultados semelhantes aos obtidos neste trabalho, com perfilhamento da cana-de açúcar respondendo positivamente às doses crescentes de N, sendo o perfilhamento máximo obtido na dose de 95 kg ha⁻¹ de N (20 perfilhos m⁻¹).

17 Teores de N e Ca

No experimento conduzido na Usina COFCO, a aplicação de diferentes fontes de N não resultou na alteração do teor de N foliar na primeira e na segunda soqueira da cana-de-açúcar, cujos teores médios foram de 23,7 e 9,5 g kg⁻¹ de N, respectivamente (Tabela 6).

Na Usina Açucareira Guaíra, de modo geral, maiores teores de N em folhas de cana-de-açúcar foram obtidos com as fontes Uran e Nitram, após dois anos de aplicação, com acréscimos em relação à testemunha de até aproximadamente 2,0 g kg⁻¹ de N (Tabela 6).

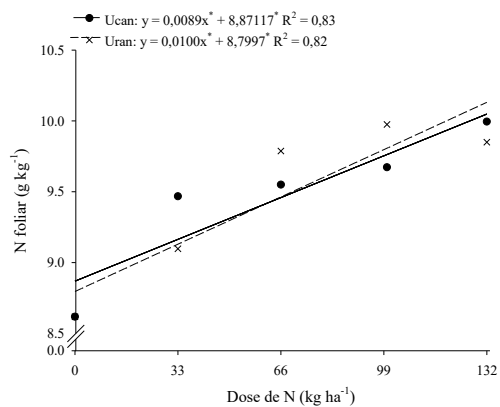
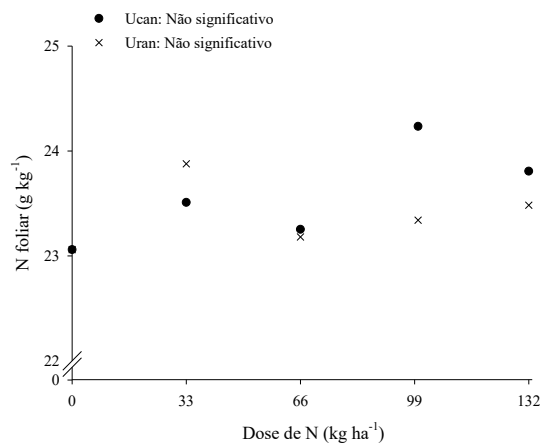
Na Usina São Francisco, apesar de não serem observadas diferenças entre os tratamentos, a aplicação de diferentes fontes líquidas de N na soqueira da cana-de-açúcar resultou em acréscimos de até aproximadamente 1,1 e 0,6 g kg⁻¹ de N após o 2º e 3º cortes, respectivamente (Tabela 6).

Tabela 6. Teores de N foliar na cana-de-açúcar (2º e 3º cortes, variedade CTC 9001, Usina COFCO, faz. Guarani, Sebastianópolis do Sul – SP, variedade IAC 91-1099. Usina Guaíra, faz. Capão da Onça, Guaíra – SP, variedade CTC 4. Usina São Francisco, faz. Bela Vista – Sete Lagoas, Quirinópolis - GO após dois anos de aplicação de diferentes fontes líquidas de N na soqueira.

| Tratamento | Dose de N (kg ha ⁻¹) | N (g kg ⁻¹) | |
|---|-------------------------------------|-------------------------|----------|
| | | 2º corte | 3º corte |
| COFCO <i>International</i> | | | |
| Testemunha | 0 | 23,1 a | 8,6 a |
| Ucan | 100 | 24,2 a | 9,7 a |
| Uran | 100 | 23,3 a | 10,0 a |
| Nitram | 100 | 23,5 a | 9,8 a |
| 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca | 100 | 24,1 a | 9,6 a |
| Ureia líquida | 100 | 24,0 a | 9,4 a |
| Médias | | 23,7 | 9,5 |
| 2º corte: CV: 3,8%. 3º corte: CV: 7,5% | | | |
| Usina Açucareira Guaíra | | | |
| Testemunha | 0 | 21,4 b | 10,2 c |
| Ucan | 100 | 21,9 b | 10,6 b |
| Uran | 100 | 22,3 a | 11,1 a |
| Nitram | 100 | 23,2 a | 10,7 b |
| 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca | 100 | 21,6 b | 10,2 c |
| Ureia líquida | 100 | 22,9 a | 10,2 c |
| Médias | | 22,1 | 10,5 |
| 2º corte: CV: 4,0%. 3º corte: CV: 3,4% | | | |
| Usina São Francisco | | | |
| Testemunha | 0 | 20,2 b | 9,6 a |
| Ucan | 100 | 20,8 a | 9,9 a |
| Uran | 100 | 21,3 a | 9,9 a |
| Nitram | 100 | 21,3 a | 10,0 a |
| 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca | 100 | 20,8 a | 10,2 a |
| Ureia líquida | 100 | 20,3 b | 10,1 a |
| Médias | | 20,8 | 9,9 |
| 2º corte: CV (%): 2,5. 3º corte: CV: 2,4% | | | |

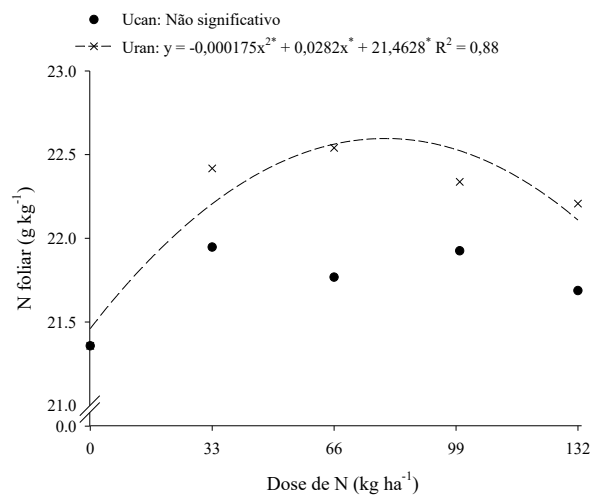
Médias seguidas por letras distintas na coluna são diferentes pelo teste de Scott-Knott a 0,10 de significância.

Na Usina COFCO, não foram obtidos ajustes de modelos de regressão significativos que demonstrem o efeito da aplicação de doses crescentes de Uran e Ucan nos teores de N da primeira soqueira da cana-de-açúcar (Figura 8a). Por outro lado, na segunda soqueira, acréscimos lineares de aproximadamente 0,1 g kg⁻¹ de N são obtidos a cada 1,0 kg ha⁻¹ de N adicionado através das fontes Uran e Ucan (Figura 8b)

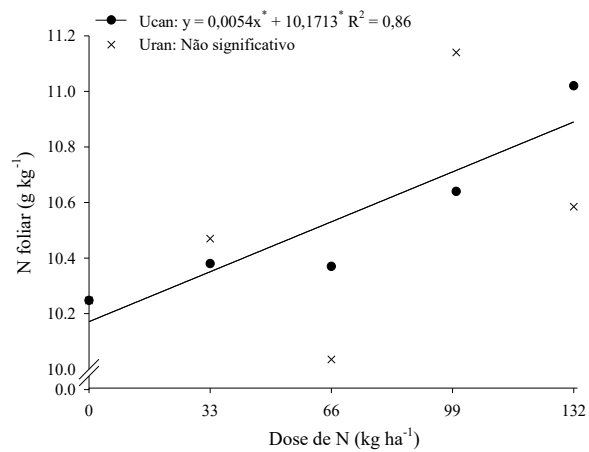


(a)

(b)



(c)



(d)

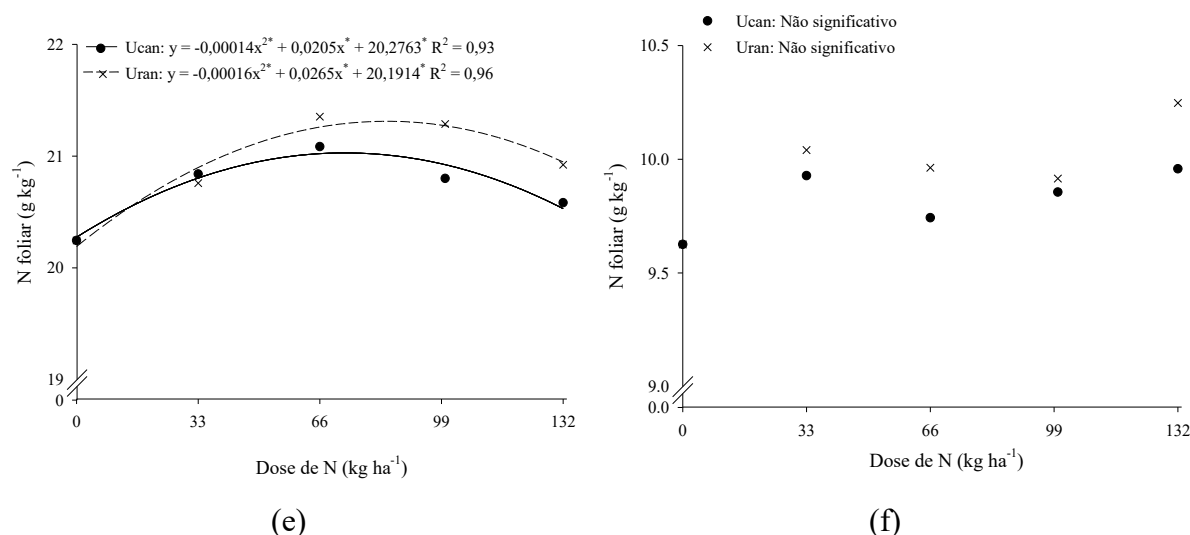


Figura 8. Teores de N em folhas de cana-de-açúcar após o primeiro (a,c,e) e segundo (b,d,f) ano de aplicação de doses crescentes de N através das fontes Ucan e de Uran (2º e 3º cortes, variedade CTC 9001, Usina COFCO (a,b), faz. Guarani, Sebastianópolis – SP, amostragem em março/18 e janeiro/2019, aos 90 e 104 DAA, respectivamente; 2º e 3º cortes, variedade IAC 91-1099, Usina Guaíra (c,d), faz. Capão da Onça, Guaíra – SP, amostragem em abril/18 e fevereiro/2019, aos 105 e 70 DAA, respectivamente; 2º e 3º cortes, variedade CTC 4, Usina São Francisco (e,f), faz. Bela Vista – Sete Lagoas, Quirinópolis – GO, amostragem em abril/18 e fevereiro/2019, aos 104 e 98 DAA, respectivamente)

Na Usina Açucareira Guaíra, não foram obtidos ajustes de modelos de regressão significativos que demonstrem o efeito da aplicação de doses crescentes de Ucan na primeira soqueira e Uran na segunda soqueira da cana-de-açúcar, nos teores de N (Figura 8c;8d). Por outro lado, aplicação de doses crescentes de Uran no primeiro ano (2º corte) resultou em modelo polinomial quadrático, cujos melhores resultados seriam observados com a utilização desta fonte na dose de 81 kg ha⁻¹ de N (ponto máximo da curva) (Figura 8c). Por outro lado, a aplicação do Ucan no segundo ano promoveu acréscimos lineares nos teores foliares de N, com aumentos de 0,5 g kg⁻¹ de N a cada 100 kg ha⁻¹ de N adicionados através desta fonte (Figura 8d).

No primeiro ano de aplicação das doses crescentes de N na soqueira na Usina São Francisco, modelos polinomiais quadráticos foram obtidos quanto aos teores de N e folhas de cana-de-açúcar, cujos melhores resultados seriam obtidos com a aplicação da dose de 73 e 83 kg ha⁻¹ de N através das fontes Uran e Ucan (ponto máximo das curvas) (Figura 8e). Não foram obtidos modelos significativos quanto aos teores foliares de N no segundo ano do experimento (3º corte) (Figura 8f).

O N é um dos nutrientes mais extraídos pela maioria das culturas, a exemplo da cana-de-açúcar (KORNDORFER, 2018). Desta forma, o N na planta é importante,

tendo função estrutural, participando de diversos compostos orgânicos e processos fisiológicos vitais para as plantas (MALAVOLTA et al., 1997). Os teores de N obtidos no primeiro ano do experimento, apresentaram dentro da faixa considerada ideal para a cultura ($18 - 25 \text{ g kg}^{-1}$), segundo Raij (1997). Também se apresentaram dentro da faixa ideal, relatada por Orlando Filho e Zambello Júnior (1979) sendo a faixa de 20 a 22 g kg^{-1} . Os mesmos, em 1981 concluíram que o teor adequado está na faixa de 19 e 24 g kg^{-1} de N. No segundo ano de avaliações, os teores foliares foram inferiores aos observados no ano anterior. Prado e Pancelli (2008) também observaram decréscimo nos teores de N foliar, podendo este fato estar relacionado à maior produtividade obtida no terceiro corte. Deste modo, os resultados obtidos associam-se ao efeito de diluição, ou seja, a concentração dos nutrientes é diluída com maior crescimento da planta, conforme relatado na literatura (JARREL e BEVERLY, 1981).

Na avaliação dos teores de Ca, na Usina COFCO, nota-se que, no primeiro ano de aplicação (2º corte), teores superiores ao tratamento testemunha foram obtidos, exceto quando a parcela experimental recebeu 6 kg ha^{-1} de Ca, proveniente da fonte Ucan (Tabela 7), se apresentando dentro da faixa ideal para cultura da cana-de-açúcar ($2 - 8 \text{ g kg}^{-1}$ (Raij et al., 1997)). No segundo ano (3º corte), teores superiores ao tratamento testemunha foram obtidos com as duas maiores doses de Ucan e com a aplicação de 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca, sendo que as mesmas dentro da faixa ideal para cultura.

No experimento conduzido na Usina Açucareira Guaíra, em avaliação dos teores de Ca, nota-se que, no primeiro ano de aplicação (2º corte), teores superiores ao tratamento testemunha foram obtidos independentemente da fonte e da dose utilizada, de forma que os teores obtidos se enquadram na faixa estabelecida por Raij et al. (1997). Enquanto que, no segundo ano (3º corte), nenhuma fonte foi superior à testemunha (Tabela 7), sendo que apenas a menor dose de Ca proveniente do Ucan se apresentou abaixo da faixa ideal para cultura.

Tabela 7. Teores de Ca foliar na cana-de-açúcar (2º e 3º cortes, variedade CTC 9001, Usina COFCO, faz. Guarani, Sebastianópolis do Sul – SP, variedade IAC 91-1099. Usina Guaíra, faz. Capão da Onça, Guaíra – SP, variedade CTC 4. Usina São Francisco, faz. Bela Vista – Sete Lagoas, Quirinópolis - GO após dois anos de aplicação de diferentes fontes líquidas de N e Ca na soqueira.

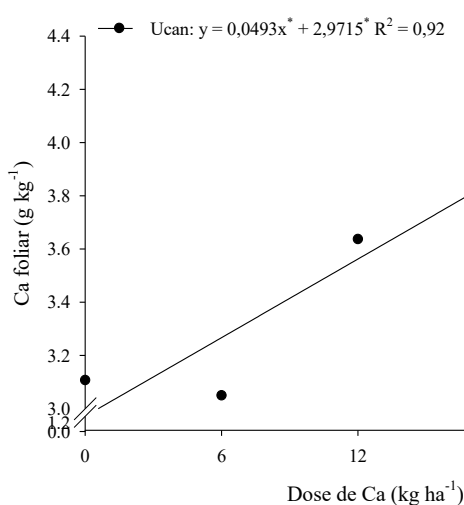
| Tratamento | Dose de Ca (kg ha ⁻¹) | Ca (g kg ⁻¹) | |
|---|--------------------------------------|--------------------------|----------|
| | | 2º corte | 3º corte |
| COFCO <i>International</i> | | | |
| Testemunha | 0 | 3,1 c | 1,2 b |
| Ucan | 6 | 3,1 c | 1,2 b |
| Ucan | 12 | 3,6 b | 1,9 b |
| Ucan | 18 | 3,8 b | 2,7 a |
| Ucan | 24 | 4,2 a | 3,3 a |
| 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca | 5,0 | 3,5 b | 1,4 b |
| Médias | | 3,6 | 2,1 |
| 2º corte: CV: 9,1%. 3º corte: CV: 3,5% | | | |
| Usina Açucareira Guaíra | | | |
| Testemunha | 0 | 3,4 b | 4,0 a |
| Ucan | 6 | 5,7 a | 1,6 c |
| Ucan | 12 | 6,1 a | 2,8 b |
| Ucan | 18 | 5,9 a | 2,9 b |
| Ucan | 24 | 5,6 a | 3,7 a |
| 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca | 5,0 | 5,6 a | 2,3 b |
| Médias | | 5,4 | 3,0 |
| 2º corte: CV: 8,7%. 3º corte: CV: 3,5% | | | |
| Usina São Francisco | | | |
| Testemunha | 0 | 2,7 a | 4,0 a |
| Ucan | 6 | 2,8 a | 4,4 a |
| Ucan | 12 | 2,8 a | 4,6 a |
| Ucan | 18 | 2,7 a | 4,5 a |
| Ucan | 24 | 2,7 a | 3,4 a |
| 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca | 5,0 | 2,7 a | 3,1 a |
| Médias | | 2,7 | 4,0 |
| 2º corte: CV: 10,2%. 3º corte: CV: 7,5% | | | |

Médias seguidas por letras distintas na coluna são diferentes pelo teste de Scott-Knott a 0,10 de significância.

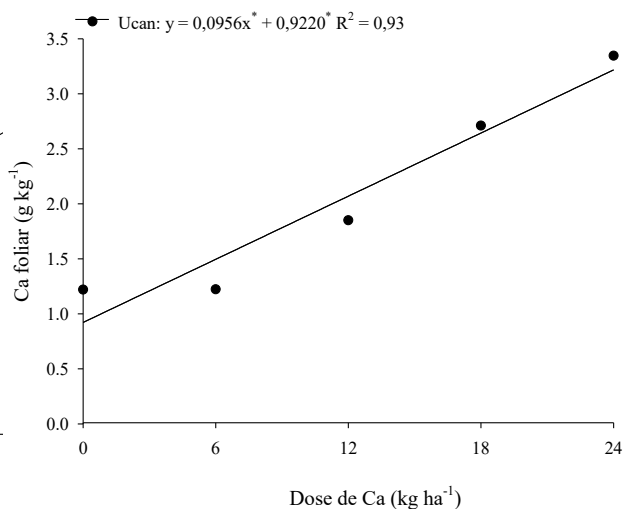
A aplicação das doses crescentes de Ucan na Usina COFCO resultou em acréscimos lineares nos teores de Ca em folhas de cana-de-açúcar com aumentos de aproximadamente 0,05 e 0,1 g kg⁻¹ de Ca a cada 1 kg ha⁻¹ de Ca adicionado após o primeiro e o segundo ano, respectivamente (Figura 9 a,b).

A aplicação das doses crescentes de Ucan na Usina Açucareira Guaíra resultou modelo de regressão significativo quanto aos teores foliares de Ca apenas no primeiro ano de aplicação, cujos melhores resultados seriam obtidos com a utilização desta fonte na dose de 15 kg ha⁻¹ de Ca (Figura 9c).

Na Usina São Francisco, em relação aos teores foliares de Ca, nota-se que não foram observadas diferenças entre os tratamentos (Tabela 7), de modo que em ambos os anos de avaliações os teores de Ca foliar se apresentaram dentro da faixa ideal para cultura. Na avaliação de doses crescentes de Ca provenientes do Ucan, não foram obtidos ajustes de modelos de regressão significativos para as doses crescentes de Ucan (Figura 9 e,f).



(a)



(b)

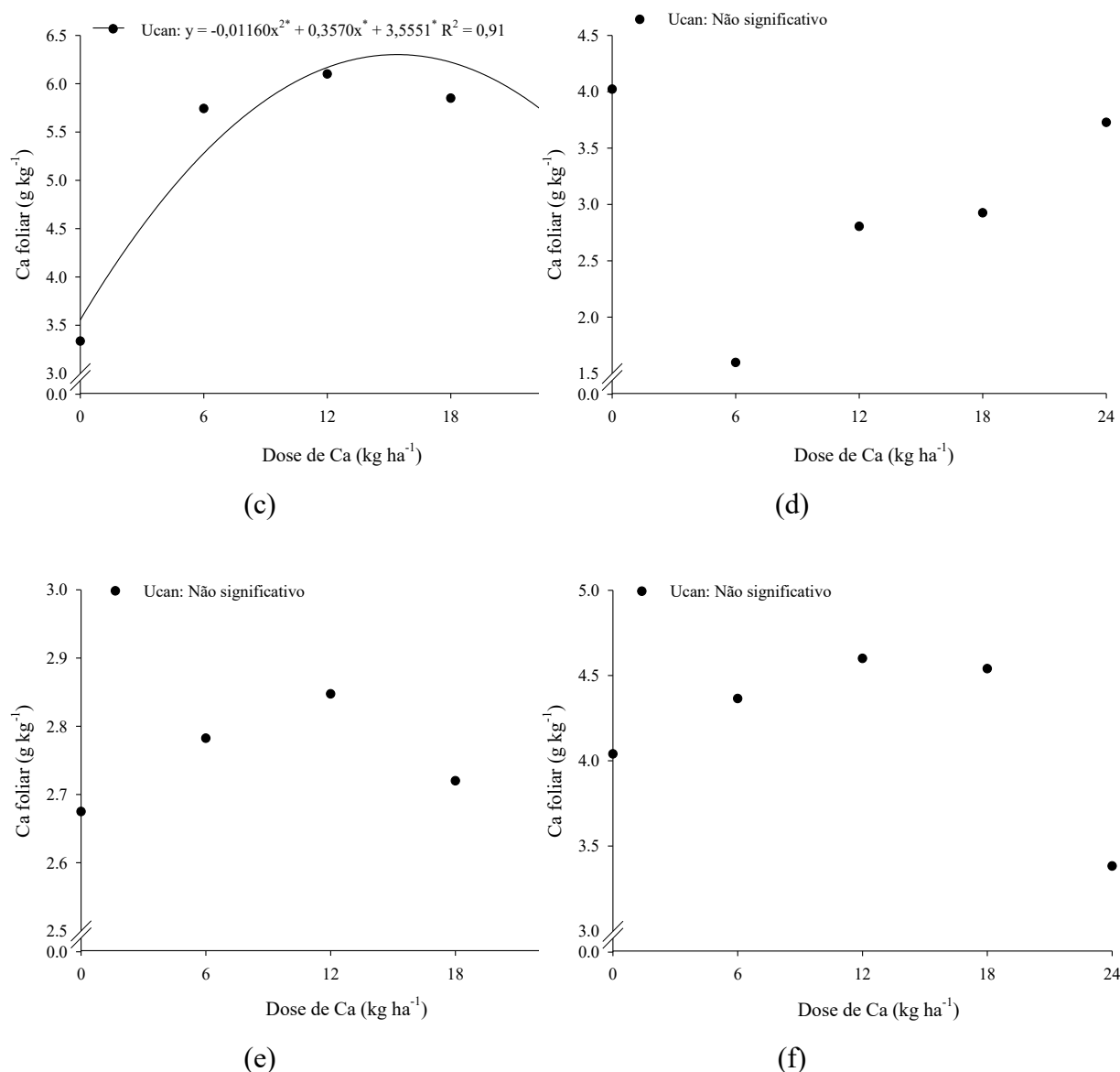


Figura 9. Teores de Ca em folhas de cana-de-açúcar após o primeiro (a,c,e) e segundo (b,d,f) ano de aplicação de doses crescentes de Ca através das fontes Ucan (2º e 3º cortes, variedade CTC 9001, Usina COFCO (a,b), faz. Guarani, Sebastianópolis – SP, amostragem em março/18 e janeiro/2019, aos 90 e 104 DAA, respectivamente; 2º e 3º cortes, variedade IAC 91-1099, Usina Guaíra (c,d), faz. Capão da Onça, Guaíra – SP, amostragem em abril/18 e fevereiro/2019, aos 105 e 70 DAA, respectivamente; 2º corte, variedade CTC 4, Usina São Francisco (e,f), faz. Bela Vista – Sete Lagoas, Quirinópolis – GO, amostragem em abril/18 e fevereiro/2019, aos 104 e 98 DAA, respectivamente)

18 Produtividades de colmos e açúcar

Na Usina COFCO, a aplicação das diferentes fontes líquidas de N resultou em produtividade de colmos e de açúcar superiores ao tratamento controle após o 2º corte da cana-de-açúcar (primeiro ano do experimento), exceto quando a ureia líquida foi utilizada (Tabelas 8 e 9). Dessa forma, acréscimos de até aproximadamente 15 e 2,5

toneladas de colmos e de açúcar por hectare, respectivamente, são obtidos com a aplicação de N (Tabelas 8 e 9).

Após o 3º corte (segundo ano do experimento), apesar de não serem observadas diferenças entre os tratamentos, ressalta-se que acréscimos de até aproximadamente 24 e 3,5 toneladas de colmos e de açúcar por hectare, respectivamente, foram obtidos com a adição de fontes líquidas de N na soqueira, cujos melhores resultados foram observados com as fontes Ucan, Nitram e 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca (Tabela 8).

Quanto aos valores acumulados dos dois cortes, nota-se que a aplicação das fontes líquidas de N resultou em valores de TCH superiores ao tratamento testemunha, independentemente da fonte e da dose utilizada, com acréscimos entre 20 e 40 t ha⁻¹. (Tabela 8).

Na Usina Açucareira Guaíra, de modo geral, não foram observadas diferenças entre os tratamentos quanto à produtividade de colmos da cana-de-açúcar após dois anos de aplicação de fontes líquidas de N na soqueira (Tabela 8). Entretanto, acréscimos em relação ao tratamento testemunha de até 11,6 e 2 toneladas de colmos são obtidos no primeiro ano de aplicação (2º corte) das fontes líquidas de N, cujos melhores resultados foram observados com o tratamento 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca (Tabela 8). No segundo ano de aplicação (3º corte), acréscimos de até 7 toneladas de colmos por hectare foram obtidos, mas, neste caso, os melhores resultados foram observados com a fonte Nitram (Tabela 8).

Ainda na avaliação da Usina Açucareira Guaíra, a produtividade acumulada após dois cortes, à aplicação das fontes de N resultou em valores de TCH e TAH superiores ao tratamento testemunha, exceto quando a ureia líquida foi utilizada. Dessa forma, observou-se acréscimos em relação à testemunha que variam de 9,2 a 16 toneladas de colmos por hectare e de 2,7 a 3,5 toneladas de açúcar por hectare foram obtidos, cujos melhores resultados foram observados com as fontes Nitram e 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca (Tabelas 8 e 9). Apesar de não serem observadas diferenças entre os tratamentos quanto à produtividade de açúcar após o primeiro ano (2º corte), nota-se que, após o segundo ano (3º corte), as fontes nitrogenadas resultaram em valores TAH superiores ao tratamento testemunha, independentemente da fonte utilizada com acréscimos de até 2,0 t ha⁻¹ (Tabela 9).

Na Usina São Francisco, a utilização das fontes Uran e Nitram resultou em produtividades de colmos e de açúcar superiores aos demais tratamentos após ambos os cortes da cana-de-açúcar (Tabelas 8 e 9). No primeiro ano de aplicação (2º corte),

acréscimos de até 16 e 2,5 toneladas de colmos e de açúcar por hectare, respectivamente, foram obtidos, enquanto que, após o segundo ano (3º corte), obtiveram-se acréscimos de até 29 e 5,3 toneladas de colmos e de açúcar por hectare, respectivamente.

Esses resultados também foram observados quanto aos valores acumulados, cujas maiores produtividades foram obtidas com as fontes Uran e Nitram com acréscimos em relação à testemunha de até 45 e 8 toneladas de colmos e de açúcar por hectare, respectivamente, após dois anos de aplicação de fontes líquidas de N na soqueira (Tabelas 8 e 9).

Tabela 8. Produtividade da colmos (TCH) da cana-de-açúcar (2º e 3º cortes, variedade CTC 9001, Usina COFCO, faz. Guarani, Sebastianópolis do Sul – SP, variedade IAC 91-1099. Usina Guaíra, faz. Capão da Onça, Guaíra – SP, variedade CTC 4. Usina São Francisco, faz. Bela Vista – Sete Lagoas, Quirinópolis - GO após dois anos de aplicação de diferentes fontes líquidas de N na soqueira.

| Tratamento | Dose de N (kg ha ⁻¹) | TCH (t ha ⁻¹) | | |
|--|-------------------------------------|---------------------------|----------|-----------|
| | | 2º corte | 3º corte | Acumulado |
| COFCO <i>International</i> | | | | |
| Testemunha | 0 | 53,1 b | 89,8 a | 142,9 b |
| Ucan | 100 | 66,9 a | 113,6 a | 180,5 a |
| Uran | 100 | 65,0 a | 102,9 a | 167,9 a |
| Nitram | 100 | 65,6 a | 109,7 a | 175,3 a |
| 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca | 100 | 67,8 a | 112,3 a | 180,1 a |
| Ureia líquida | 100 | 60,0 b | 102,6 a | 162,6 a |
| Médias | | 63,1 | 105,2 | 168,2 |
| 2º corte: CV: 10,7%. 3º corte: CV: 12,9%. Acumulado: 8,2%. | | | | |
| Usina Açucareira Guaíra | | | | |
| Testemunha | 0 | 93,7 a | 141,3 a | 235,0 b |
| Ucan | 100 | 101,4 a | 144,8 a | 246,1 a |
| Uran | 100 | 101,0 a | 143,2 a | 244,2 a |
| Nitram | 100 | 102,0 a | 148,6 a | 250,5 a |
| 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca | 100 | 105,3 a | 146,2 a | 251,4 a |
| Ureia líquida | 100 | 96,4 a | 143,2 a | 239,6 b |
| Médias | | 99,3 | 144,5 | 244,5 |
| 2º corte: CV: 7,8%. 3º corte: CV: 4,0%. Acumulado: 3,4%. | | | | |
| Usina São Francisco | | | | |
| Testemunha | 0 | 68,1 b | 69,4 b | 137,5 b |
| Ucan | 100 | 68,4 b | 84,3 b | 152,7 b |
| Uran | 100 | 84,2 a | 98,3 a | 182,5 a |
| Nitram | 100 | 79,1 a | 96,8 a | 175,9 a |

| | | | | |
|--------------------------|-----|--------|--------|---------|
| 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca | 100 | 71,5 b | 84,7 b | 156,2 b |
| Ureia líquida | 100 | 69,6 b | 82,4 b | 152,0 b |
| Médias | | 73,5 | 86,0 | 159,5 |

2º corte: CV: 8,1%. 3º corte: CV: 13,2%. Acumulado: 8,7%.

Médias seguidas por letras distintas na coluna são diferentes pelo teste de Scott-Knott a 0,10 de significância.

Na cana-de-açúcar as maiores produtividades são observadas, na maioria dos casos em cana-planta (maior potencial produtivo), diminuindo à medida que os cortes são realizados. Orlando Filho et al. (1999) observaram redução na produtividade de colmos e açúcar ao longo dos ciclos da cana-de-açúcar, sendo a maior redução da cana-planta (cana de ano e meio) para a primeira soqueira. Ainda neste trabalho, concluíram que a cana-planta e as três soqueiras posteriores responderam linearmente à adubação nitrogenada até a dose de 120 kg ha⁻¹. Chapman et al. (1983) concluíram que as soqueiras demandam maior quantidade de N para atingir maiores produtividades, possivelmente pela redução das reservas de N no solo ao longo do ciclo produtivo. Neste sentido, a recomendação da dose ideal de N pode constituir-se numa forma de reduzir as diferenças de produtividade entre soqueiras subsequentes, com potencial para aumentar a longevidade do canavial (SOBRAL; LIRA, 1984). Orlando Filho et al. (1999) ao constatarem este efeito afirmaram que a resposta da cana ao N se refletiu no maior vigor das soqueiras, aumentando a produção nos cortes subsequentes, quando comparadas cana com adubação e sem adubação nitrogenada.

Vitti et al. (2007), avaliando a produtividade de colmos relacionada ao efeito do N residual, obtiveram resposta linear à aplicação de N na produtividade de colmos e de açúcar por hectare.

Tabela 9. Produtividade de açúcar (TAH) da cana-de-açúcar (2º e 3º cortes, variedade CTC 9001, Usina COFCO, faz. Guarani, Sebastianópolis do Sul – SP, variedade IAC 91-1099. Usina Guaira, faz. Capão da Onça, Guaira – SP, variedade CTC 4. Usina São Francisco, faz. Bela Vista – Sete Lagoas, Quirinópolis - GO após dois anos de aplicação de diferentes fontes líquidas de N na soqueira.

| Tratamento | Dose de N (kg ha ⁻¹) | TAH (t ha ⁻¹) | | |
|--|-------------------------------------|---------------------------|----------|-----------|
| | | 2º corte | 3º corte | Acumulado |
| COFCO <i>International</i> | | | | |
| Testemunha | 0 | 8,3 b | 12,9 a | 21,2 c |
| Ucan | 100 | 10,6 a | 16,4 a | 27,0 a |
| Uran | 100 | 10,4 a | 14,6 a | 25,0 a |
| Nitram | 100 | 10,4 a | 15,6 a | 26,1 a |
| 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca | 100 | 10,6 a | 16,1 a | 26,6 a |
| Ureia líquida | 100 | 9,4 b | 14,5 a | 23,9 b |
| Médias | | 19,9 | 15,0 | 25,0 |
| 2º corte: CV: 11.2%. 3º corte: CV: 13.5%. Acumulado: 8.2%. | | | | |

2º corte: CV: 11,2%. 3º corte: CV: 13,5%. Acumulado: 8,2%.

| Usina Açucareira Guaíra | | | | |
|---|-----|--------|--------|--------|
| Testemunha | 0 | 14,5 a | 23,6 b | 38,1 b |
| Ucan | 100 | 15,4 a | 25,4 a | 40,8 a |
| Uran | 100 | 16,2 a | 25,0 a | 41,2 a |
| Nitram | 100 | 15,9 a | 25,5 a | 41,4 a |
| 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca | 100 | 16,4 a | 25,2 a | 41,6 a |
| Ureia líquida | 100 | 14,9 a | 24,8 a | 39,7 b |
| Médias | | 15,5 | 24,9 | 40,5 |
| <u>2º corte: CV: 8,9%. 3º corte: CV: 3,7%. Acumulado: 4,2%.</u> | | | | |
| Usina São Francisco | | | | |
| Testemunha | 0 | 10,2 b | 10,7 b | 21,0 b |
| Ucan | 100 | 10,5 b | 13,4 b | 23,9 b |
| Uran | 100 | 12,7 a | 16,0 a | 28,8 a |
| Nitram | 100 | 12,2 a | 15,9 a | 28,1 a |
| 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca | 100 | 10,6 b | 13,5 b | 24,1 b |
| Ureia líquida | 100 | 10,6 b | 13,2 b | 23,8 b |
| Médias | | 11,1 | 13,8 | 24,9 |
| <u>2º corte: CV (%): 8,9. 3º corte: CV: 14,2%. Acumulado: 9,3%.</u> | | | | |

Médias seguidas por letras distintas na coluna são diferentes pelo teste de Scott-Knott a 0,10 de significância.

Na Usina COFCO, dentre as diferentes fontes, a ureia líquida foi inferior às demais. As fontes líquidas de N também resultaram em valores de TAH acumulados superiores ao tratamento testemunha, com acréscimos de até 6 t ha⁻¹, exceto quando a ureia líquida foi utilizada (Tabela 9).

A aplicação de doses crescentes de Ucan resultou em acréscimos lineares de aproximadamente 10 e 2 toneladas de colmos e de açúcar por hectare, respectivamente, após o 2º corte da cana-de-açúcar (primeiro ano de aplicação) a cada 100 kg ha⁻¹ de N adicionados através desta fonte (Figuras 10a e 11a). Por outro lado, após o 3º corte (segundo ano de aplicação), modelo polinomial quadrático foi obtido, cujos melhores resultados seriam observados com a aplicação do Ucan na dose de 80 kg ha⁻¹ de N (ponto máximo das curvas) (Figura 10b e 11b).

Em relação ao Uran, modelo polinomial quadrático foi obtido após o primeiro ano de aplicação (2º corte), sendo que maiores produtividades de colmos e de açúcar seriam obtidas com a utilização desta fonte na dose de aproximadamente 80 kg ha⁻¹ de N (Figura 10a e 11a) (ponto máximo das curvas). Após o segundo ano (3º corte), acréscimos lineares 10,7 toneladas de colmos por hectare são obtidos a cada 100 kg ha⁻¹ de N adicionados através do Uran (Figura 10b), enquanto que não há modelo significativo para os valores de TAH (Figura 11b).

Avaliando-se o efeito das doses crescentes de N na produtividade acumulada da cana-de-açúcar, nota-se que maiores produtividades de colmo e de açúcar seriam

obtidas com a aplicação de Ucan e Uran, durante dois anos, na dose de aproximadamente 90 kg ha⁻¹ de N (ponto máximo das curvas) (Figuras 10c e 11c).

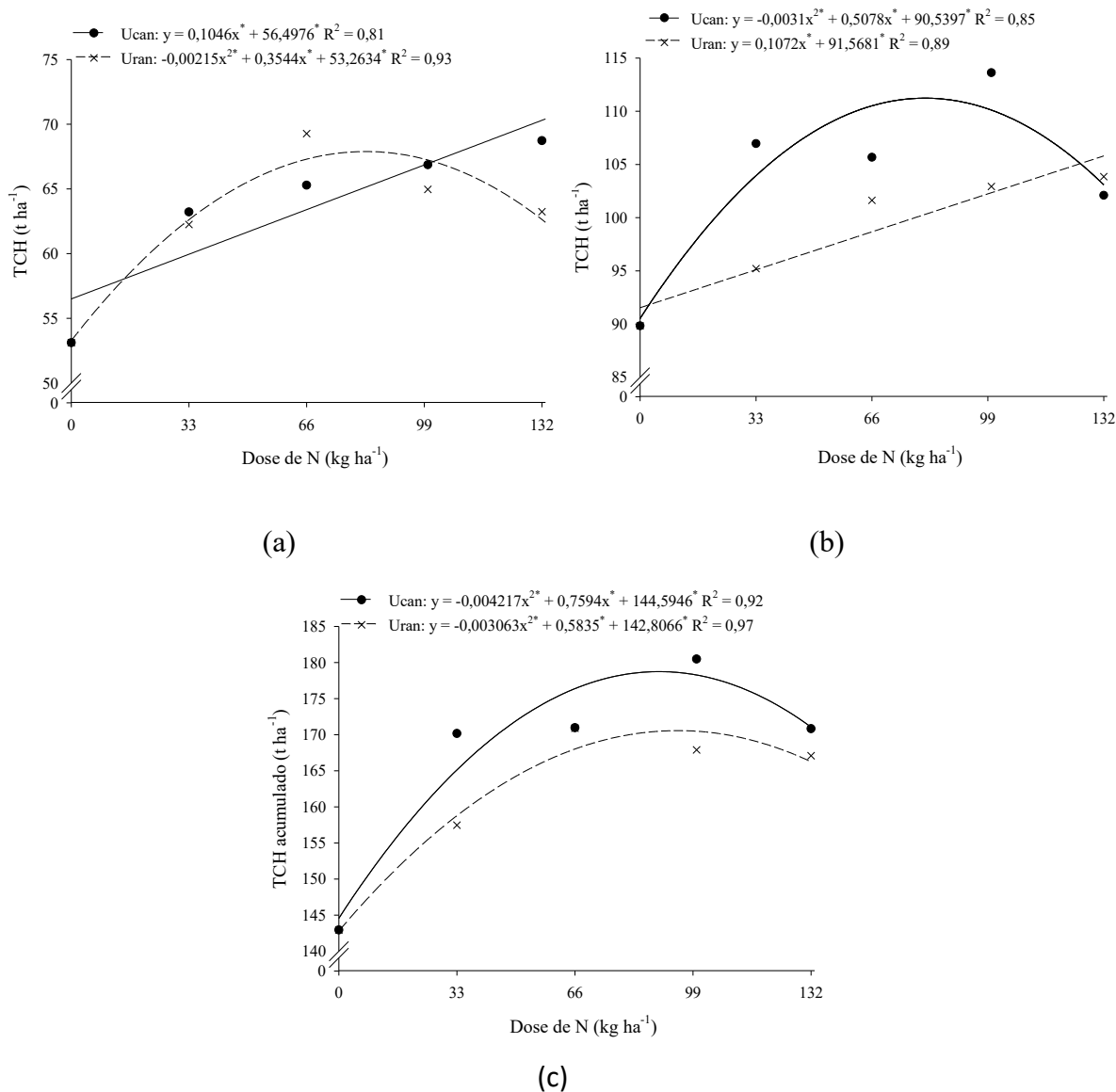


Figura 10. Produtividade de colmos (TCH) da cana-de-açúcar após o 2º corte (a), 3º corte (b) e acumulada dos dois cortes (c) em função da aplicação de doses crescentes de N através das fontes Ucan e de Uran (2º e 3º cortes, variedade CTC 9001, Usina COFCO, faz. Guarani, Sebastianópolis – SP, colheitas em agosto/2018 e maio/2019, aos 238 e 222 DAA, respectivamente).

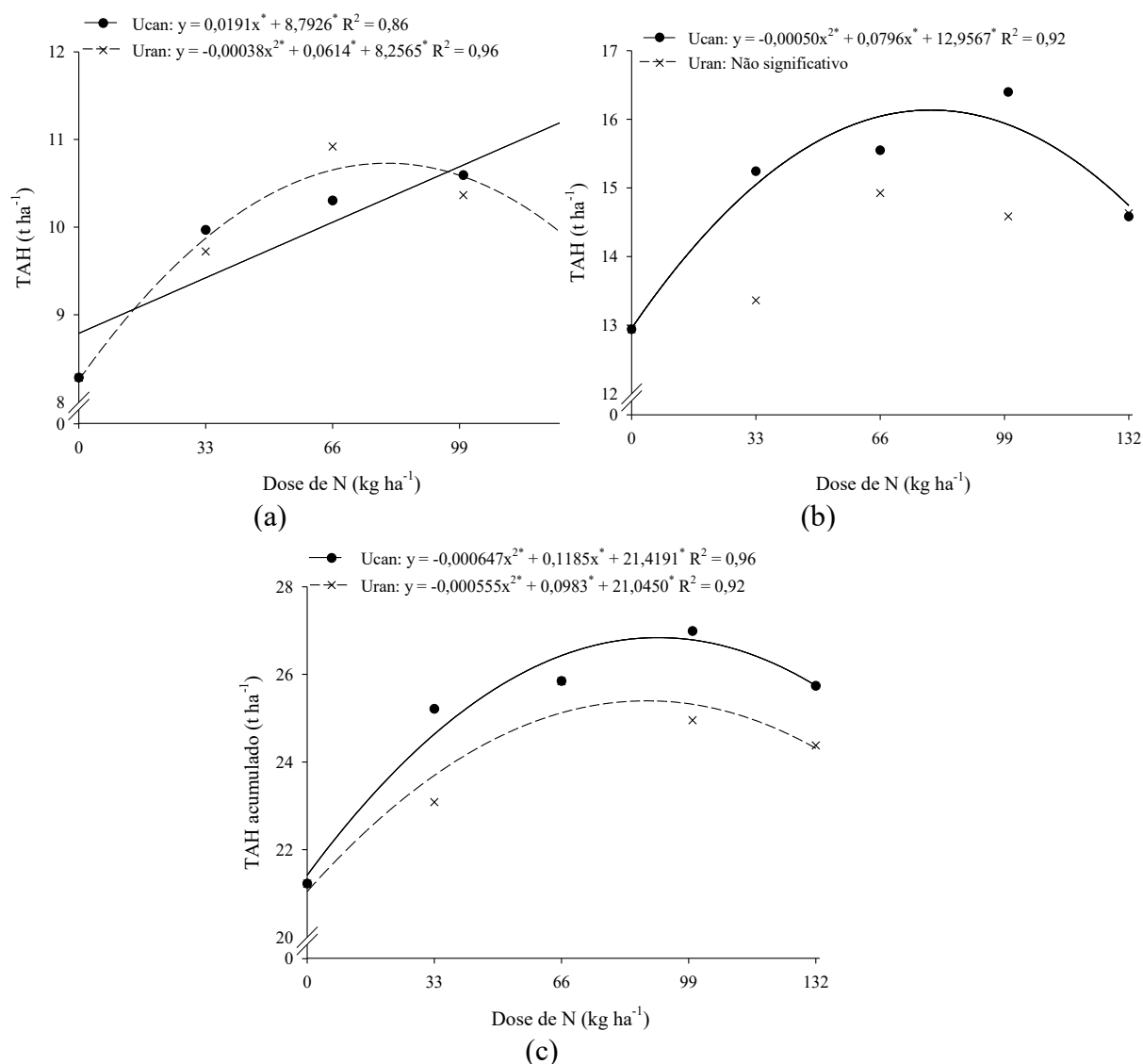


Figura 11. Produtividade de açúcar (TAH) da cana-de-açúcar após o 2º corte (a), 3º corte (b) e acumulada dos dois cortes (c) em função da aplicação de doses crescentes de N através das fontes Ucan e de Uran (2º e 3º cortes, variedade CTC 9001, Usina COFCO, faz. Guarani, Sebastianópolis – SP, colheitas em agosto/2018 e maio/2019, aos 238 e 222 DAA, respectivamente)

Em avaliação de doses crescentes de Ucan na Usina Açucareira Guaíra, resultou em modelos polinomiais quadráticos quanto às produtividades de colmos após o 2º corte, 3º corte e acumulada dos dois cortes, cujos melhores resultados seriam obtidos com a utilização desta fonte, anualmente, na dose de aproximadamente 60 kg ha⁻¹ de N (ponto máximo das curvas) (Figuras 12a, 12b e 12c). Quanto ao Uran, acréscimos lineares de aproximadamente 7,5 t ha⁻¹ são obtidos a cada 100 kg ha⁻¹ de N adicionados, anualmente, através desta fonte (Figuras 12a e 12c).

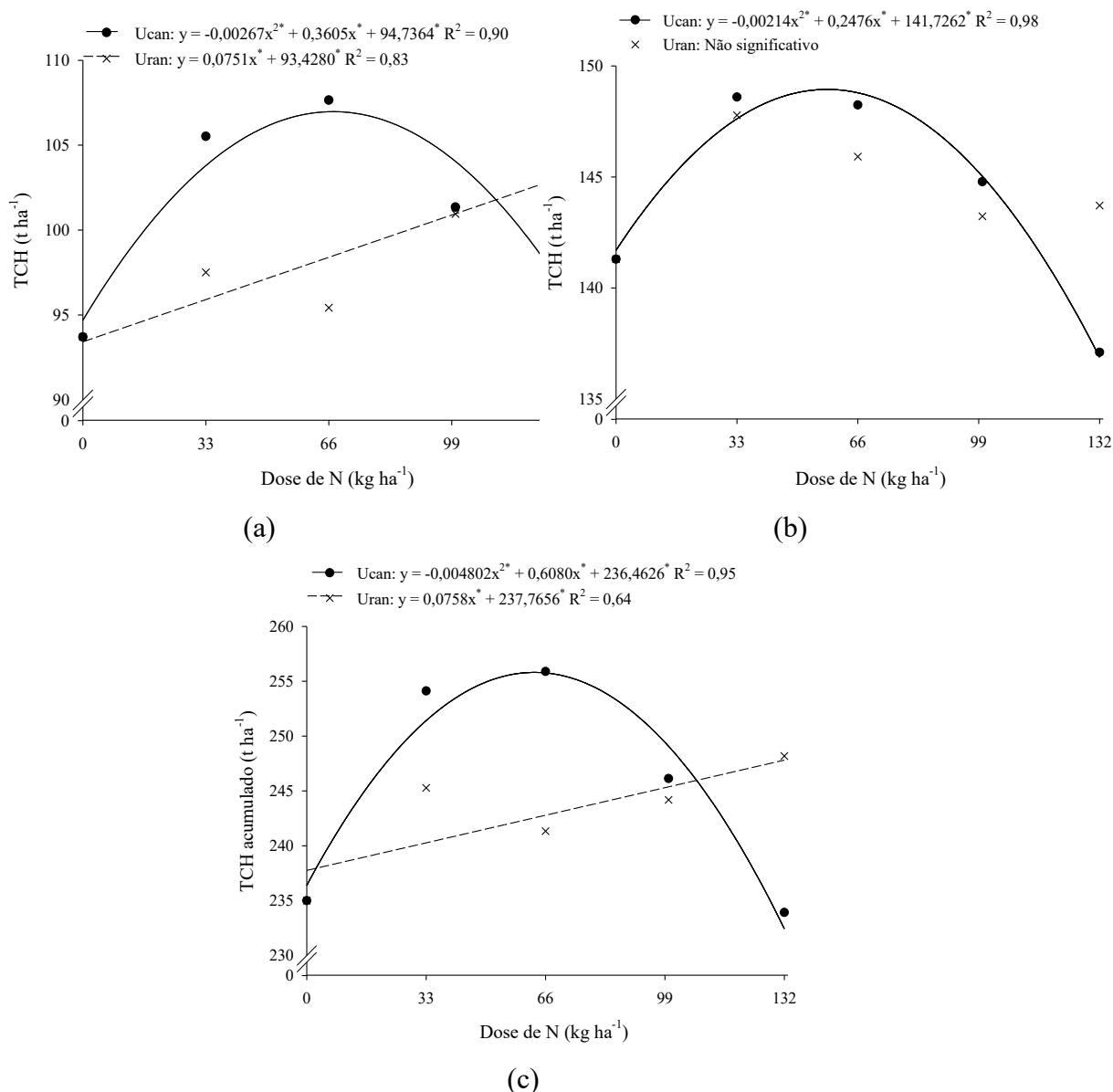


Figura 12. Produtividade de colmos (TCH) da cana-de-açúcar após o 2^o corte (a), 3^o corte (b) e acumulados dos dois cortes (c) em função da aplicação de doses crescentes de N através das fontes Ucan e de Uran (2^o e 3^o cortes, variedade IAC 91-1099, Usina Guaíra, faz. Capão da Onça, Guaíra – SP, colheitas em outubro/2018 e novembro/2019, aos 271 e 329 DAA, respectivamente).

Em relação à produtividade de açúcar, melhores resultados com a fonte Ucan seriam obtidos com a aplicação anual de aproximadamente 70 kg ha⁻¹ de N, enquanto que a fonte Uran promoveu acréscimos lineares de aproximadamente 2 t ha⁻¹ a cada 100 kg ha⁻¹ de N adicionados através desta fonte após o primeiro ano (Figura 13a) e de 2,7 t ha⁻¹ a cada 100 kg ha⁻¹ de N aplicados anualmente, após dois anos (valores acumulados) (Figura 13c).

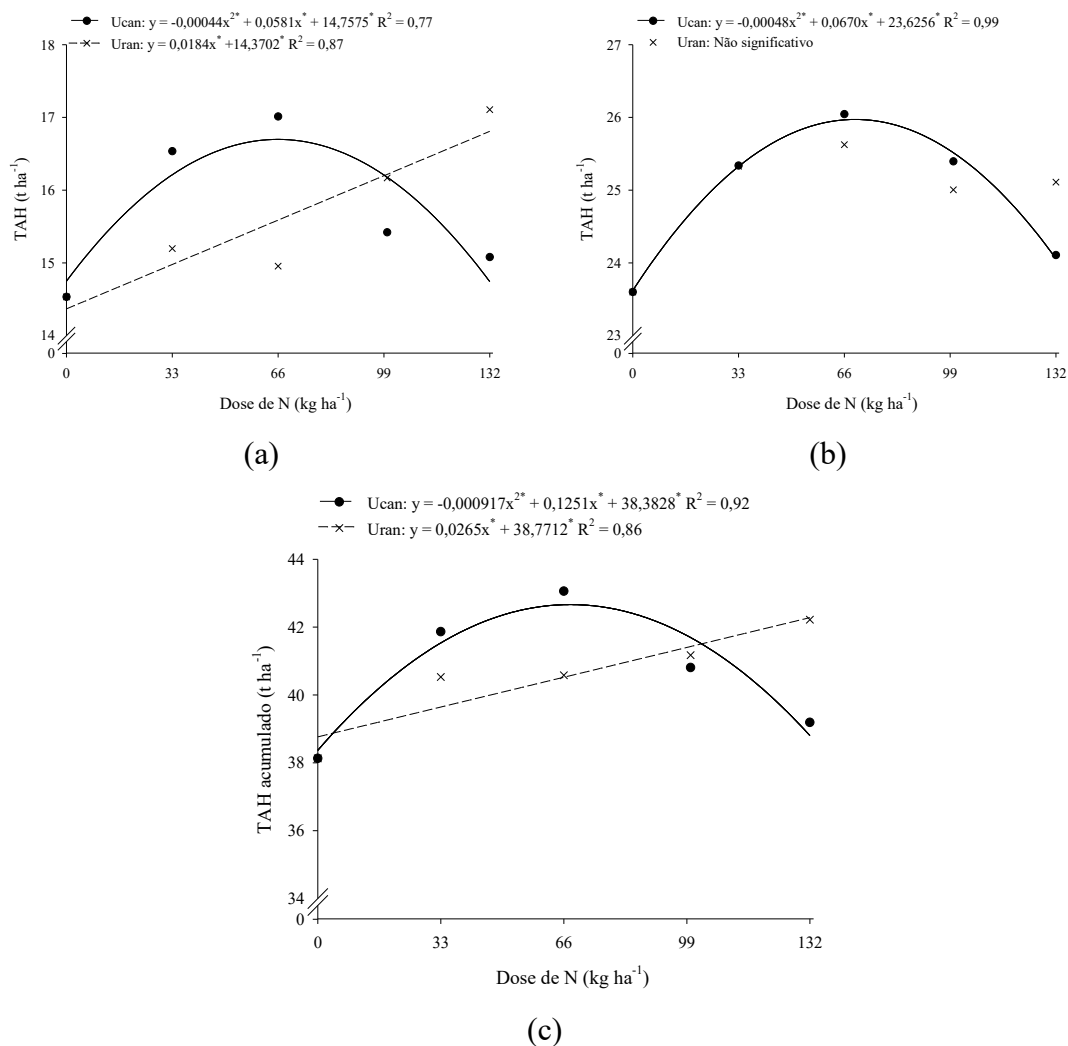


Figura 13. Produtividade de açúcar (TAH) da cana-de-açúcar após o 2º corte (a), 3º corte (b) e acumulados dos dois cortes (c) em função da aplicação de doses crescentes de N através das fontes Ucan e de Uran (2º e 3º cortes, variedade IAC 91-1099, Usina Guaíra, faz. Capão da Onça, Guaíra – SP, colheitas em outubro/2018 e novembro/2019, aos 271 e 329 DAA, respectivamente).

A aplicação de doses crescentes de Ucan na Usina São Francisco, resultou em modelo polinomial quadrático quanto à produtividade de colmos após ambos os cortes da cana-de-açúcar. De modo geral, maiores valores de TCH e TAH seriam obtidos com a utilização desta fonte nas doses de 55 kg ha⁻¹ de N no primeiro ano (2º corte) e na dose de aproximadamente 75 kg ha⁻¹ de N no segundo ano (3º corte) (ponto máximo das curvas) (Figuras 14 e 15).

Por outro lado, as doses crescentes de Uran promoveram acréscimos lineares de 14 e 2 toneladas de colmos e de açúcar por hectare, respectivamente, a cada 100 kg ha⁻¹ de N adicionados no primeiro ano de experimento (2º corte) (Figuras 14a e 15a), enquanto que, após o segundo ano de aplicação (3º corte), maiores produtividades

seriam obtidas com a adição desta fonte na dose de 78 kg ha⁻¹ de N (ponto máximo das curvas) (Figuras 14b e 15b).

Observando-se os valores acumulados, nota-se que maiores produtividades seriam obtidas com a aplicação da fonte Ucan, durante dois anos, na dose de aproximadamente 70 kg ha⁻¹ de N, enquanto que, quanto ao Uran, as doses de 100 e 92 kg ha⁻¹ de N resultariam em maiores valores de TCH e TAH, respectivamente, após dois anos de aplicação (ponto máximo das curvas) (Figuras 14c e 15c).

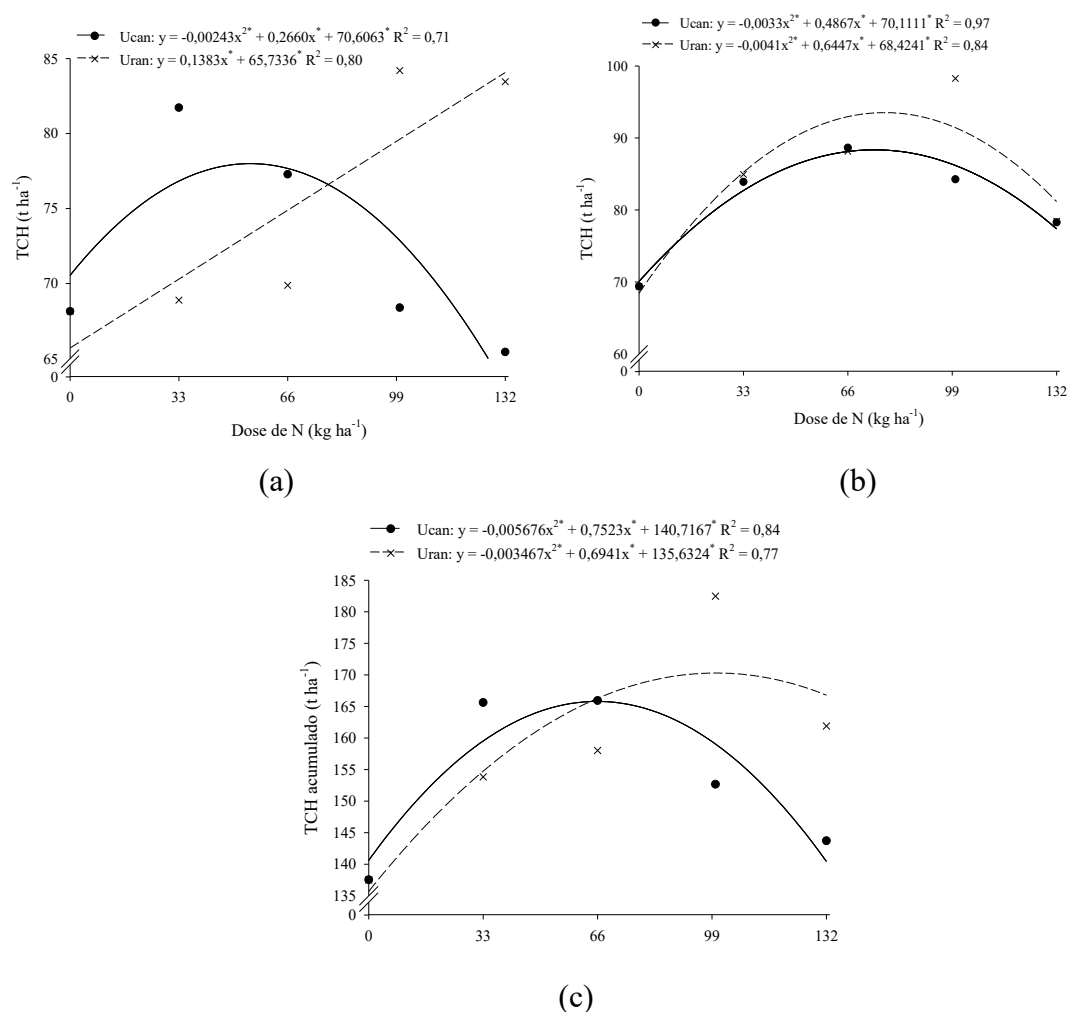


Figura 14. Produtividade de colmos (TCH) da cana-de-açúcar após o 2º corte (a), 3º corte (b) e acumulados dos dois cortes (c) em função da aplicação de doses crescentes de N através das fontes Ucan e de Uran (2º e 3º cortes, variedade CTC 4, Usina São Francisco, faz. Bela Vista – Sete Lagoas, Quirinópolis – GO, colheitas em agosto/2018 e agosto/2019, aos 217 e 258 DAA, respectivamente).

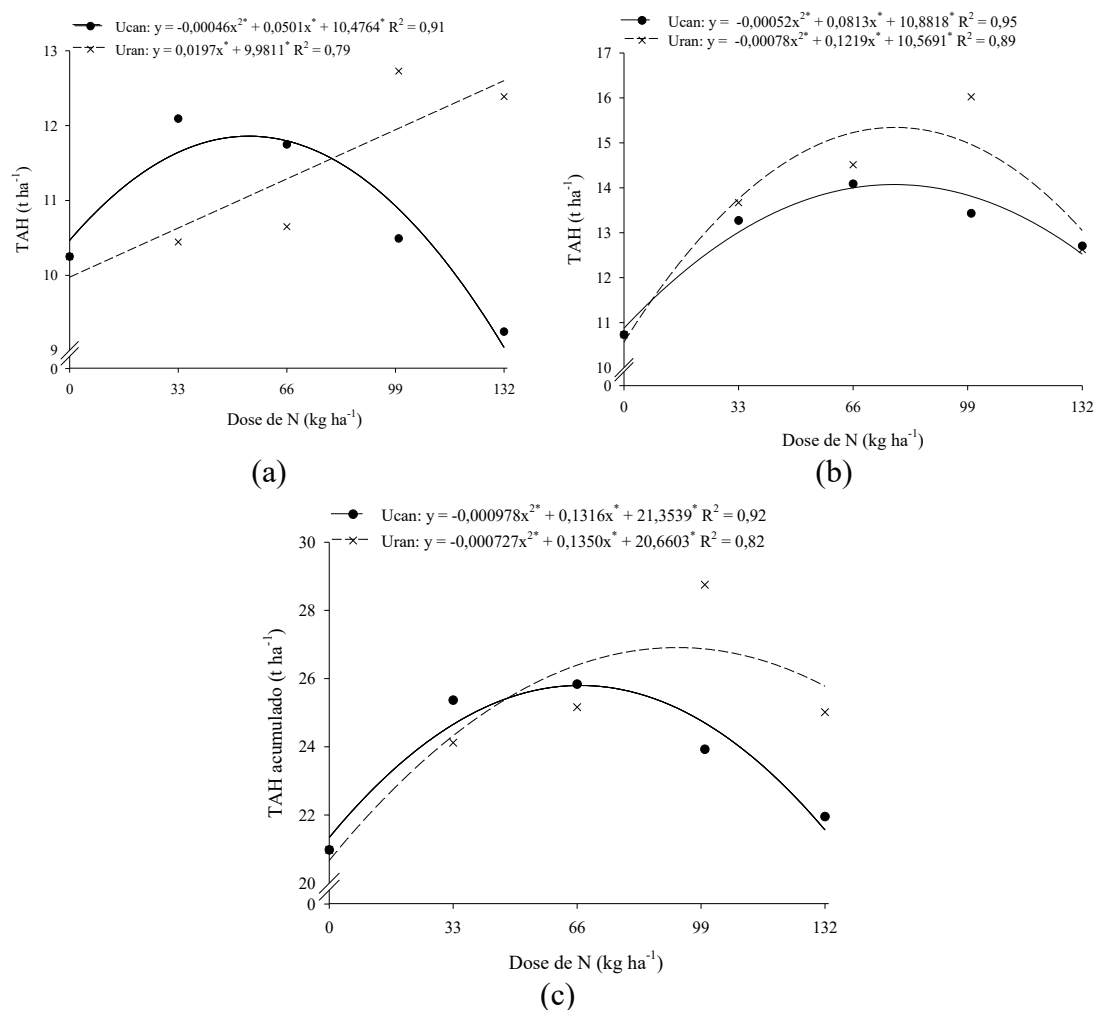


Figura 15. Produtividade de açúcar (TAH) da cana-de-açúcar após o 2º corte (a), 3º corte (b) e acumulados dos dois cortes (c) em função da aplicação de doses crescentes de N através das fontes Ucan e de Uran (2º e 3º cortes, variedade CTC 4, Usina São Francisco, faz. Bela Vista – Sete Lagoas, Quirinópolis – GO, colheitas em agosto/2018 e agosto/2019, aos 217 e 258 DAA, respectivamente).

As menores produtividades de colmos e açúcar observadas no tratamento com ureia líquida podem estar associadas às perdas de N no sistema solo-planta. Segundo Cantarella et al., (1999), a aplicação da ureia em superfície, sobre a palha, como ocorre em áreas de soqueira da cana-de-açúcar, resulta em elevadas perdas de N por volatilização de amônia (NH₃), pela não incorporação e também pela maior atividade da enzima urease. Desta forma, perdas entre 20 e 40% do N aplicado podem ser observadas com a utilização da ureia em solos com resíduos da cana-de-açúcar (DENMEAD et al., 1990). Uma vez que as outras fontes de N avaliadas combinam formas de N em sua composição, e nestas as perdas são reduzidas (CANTARELLA, 1998), pode-se explicar a produtividade de colmos maior.

19 Qualidade matéria-prima

De modo geral, não foram observadas diferenças entre os tratamentos quanto à qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar (ATR) após a aplicação de diferentes fontes líquidas de N na primeira e na segunda soqueira na Usina COFCO (Tabela 10).

Na Usina Açucareira Guaíra, não foram observadas diferenças nos valores de açúcar total recuperável com a utilização das diferentes fontes e doses de N. Entretanto, nota-se que acréscimos de aproximadamente $5,0 \text{ kg t}^{-1}$ são obtidos com a fonte Uran, na dose de 100 kg ha^{-1} de N, quando comparada à testemunha (Tabela 10).

Na Usina São Francisco, na qualidade da matéria-prima, apesar de não serem observadas diferenças entre os tratamentos, acréscimos de até aproximadamente 4 e 9 kg t^{-1} em relação ao tratamento testemunha foram obtidos com a aplicação das fontes nitrogenadas em soqueiras de 2º e 3º corte, respectivamente, cujos melhores resultados foram obtidos com a fonte Nitram (Tabela 10).

Tabela 10. Açúcar total recuperável (ATR) da cana-de-açúcar (2º e 3º cortes, variedade CTC 9001, Usina COFCO, faz. Guarani, Sebastianópolis do Sul – SP, variedade IAC 91-1099. Usina Guaíra, faz. Capão da Onça, Guaíra – SP, variedade CTC 4. Usina São Francisco, faz. Bela Vista – Sete Lagoas, Quirinópolis - GO após dois anos de aplicação de diferentes fontes líquidas de N na soqueira.

| Tratamento | Dose de N (kg ha ⁻¹) | ATR (kg t ⁻¹) | |
|---|-------------------------------------|---------------------------|----------|
| | | 2º corte | 3º corte |
| COFCO <i>International</i> | | | |
| Testemunha | 0 | 155,9 a | 143,9 a |
| Ucan | 100 | 158,2 a | 144,2 a |
| Uran | 100 | 159,7 a | 142,9 a |
| Nitram | 100 | 159,0 a | 142,7 a |
| 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca | 100 | 155,9 a | 142,8 a |
| Ureia líquida | 100 | 157,3 a | 141,5 a |
| Médias | | 157,7 | 143,0 |
| 2º corte: CV: 3,0%. 3º corte: CV: 3,3%. | | | |
| Usina Açucareira Guaíra | | | |
| Testemunha | 0 | 155,1 a | 167,0 b |
| Ucan | 100 | 152,4 a | 175,9 a |
| Uran | 100 | 160,1 a | 174,6 a |
| Nitram | 100 | 156,2 a | 171,6 a |
| 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca | 100 | 155,7 a | 172,5 a |
| Ureia líquida | 100 | 154,7 a | 173,6 a |
| Médias | | 155,7 | 172,4 |
| 2º corte: CV: 3,8%. 3º corte: CV: 1,5%. | | | |
| Usina São Francisco | | | |
| Testemunha | 0 | 150,4 a | 154,7 a |
| Ucan | 100 | 153,4 a | 158,9 a |
| Uran | 100 | 151,2 a | 163,1 a |
| Nitram | 100 | 153,9 a | 163,8 a |
| 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca | 100 | 148,5 a | 159,0 a |
| Ureia líquida | 100 | 152,6 a | 159,4 a |
| Médias | | 151,7 | 159,8 |
| 2º corte: CV: 3,9%. 3º corte: CV: 4,5%. | | | |

Médias seguidas por letras distintas na coluna são diferentes pelo teste de Scott-Knott a 0,10 de significância.

Em relação ao efeito das doses crescentes de N nos valores de ATR, na Usina COFCO, modelo de regressão significativo foi obtido somente com a aplicação do Ucan após o 2º corte da cana-de-açúcar (primeiro ano do experimento), cujos acréscimos lineares de 4 kg t⁻¹ são obtidos a cada 100 kg ha⁻¹ de N adicionados através desta fonte (Figura 16a).

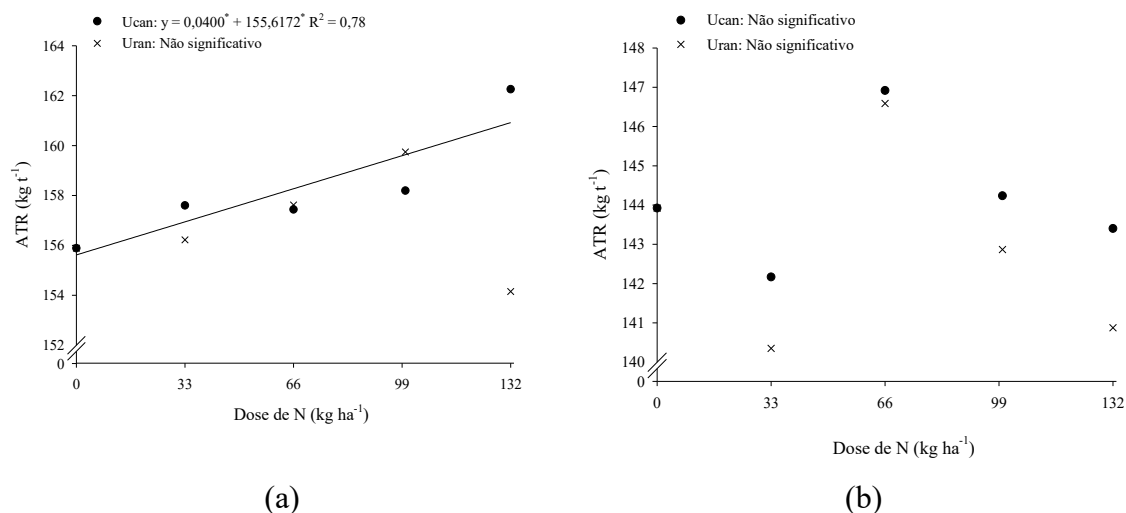


Figura 16. Açúcar total recuperável (ATR) da cana-de-açúcar após o primeiro (a) e segundo (b) ano de aplicação de doses crescentes de N através das fontes Ucan e de Uran (2º e 3º cortes, variedade CTC 9001, Usina COFCO, faz. Guarani, Sebastianópolis – SP, colheitas em agosto/2018 e maio/2019, aos 238 e 222 DAA, respectivamente).

Apesar de não obtido ajuste de modelo de regressão significativo que demonstre o efeito das doses crescentes de Ucan na qualidade da matéria-prima após o 2º corte (primeiro ano do experimento) na Usina Açucareira Guaíra, nota-se que acréscimos lineares de aproximadamente 6,5 kg t⁻¹ são obtidos a cada 100 kg ha⁻¹ de N adicionados através do Uran (Figura 16a).

Após o 3º corte (segundo ano do experimento), ambas as fontes resultaram em modelos polinomiais quadráticos, cujos melhores resultados seriam obtidos com a aplicação de aproximadamente 110 e 100 kg ha⁻¹ de Ucan e Uran, respectivamente (ponto máximo das curvas) (Figura 16b).

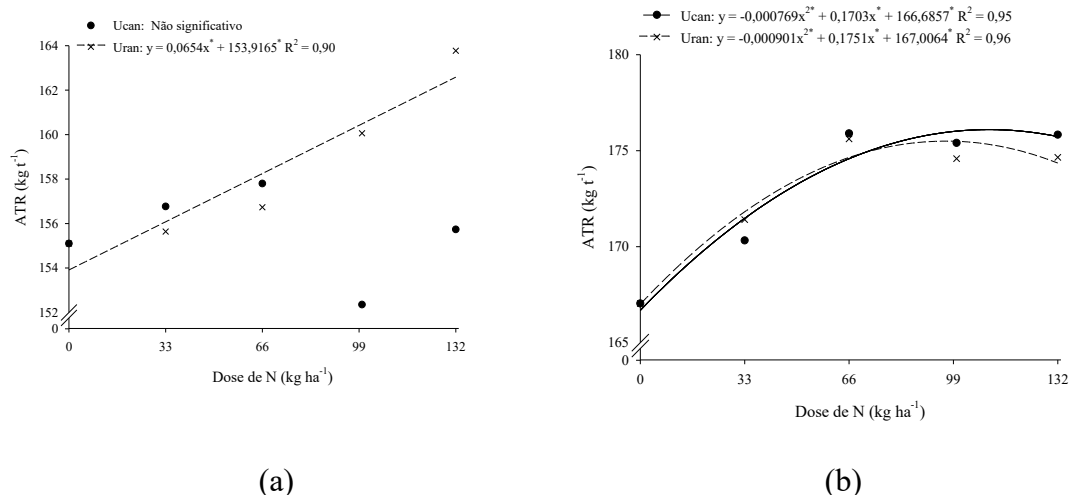


Figura 16. Açúcar total recuperável (ATR) da cana-de-açúcar após o primeiro (a) e segundo (b) ano de aplicação em função da aplicação de doses crescentes de N através das fontes Ucan e de Uran (2º e 3º cortes, variedade IAC 91-1099, Usina Guaíra, faz. Capão da Onça, Guaíra – SP, colheitas em outubro/2018 e novembro/2019, aos 271 e 329 DAA, respectivamente).

Não foram obtidos ajustes de modelos de regressão significativos que demonstrem o aumento das doses de Uran e Ucan nos valores de açúcar total recuperável após o primeiro ano de aplicação (2º corte) na Usina São Francisco (Figura 17a). Após o segundo ano de aplicação, acréscimos lineares de $5,4 \text{ kg t}^{-1}$ são obtidos a cada 100 kg ha^{-1} de N adicionados através do Ucan, enquanto que, quanto a fonte Uran, maiores valores de ATR seriam obtidos com a aplicação de cada 83 kg ha^{-1} de N (ponto máximo da curva) (Figura 17b).

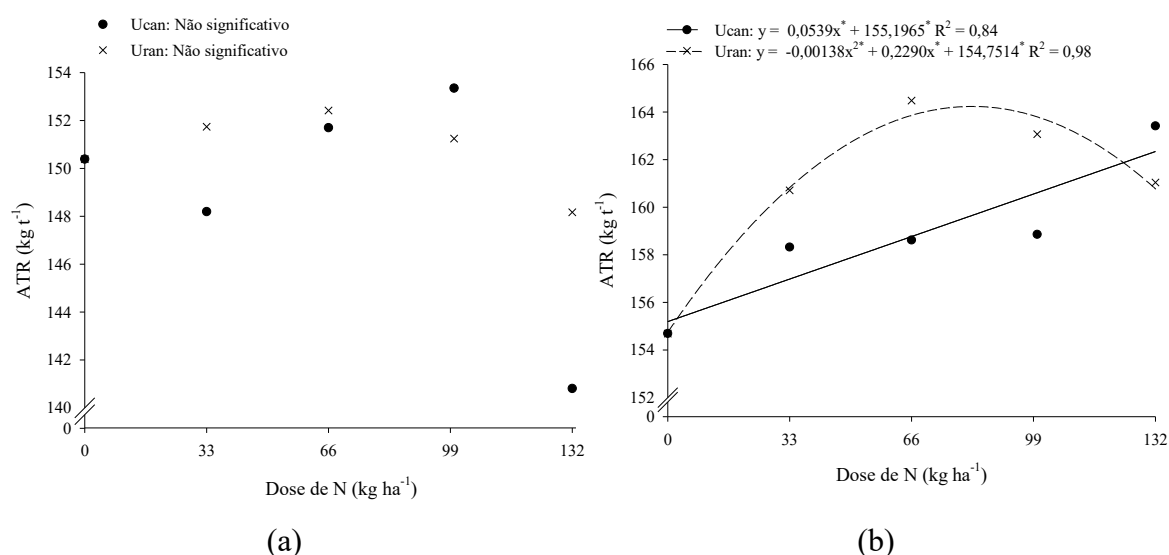


Figura 17. Açúcar total recuperável (ATR) da cana-de-açúcar após o primeiro (a) e segundo (b) ano de aplicação de doses crescentes de N através das fontes Ucan e de Uran (2º e 3º cortes, variedade CTC 4, Usina São Francisco, faz. Bela Vista – Sete Lagoas, Quirinópolis – GO, colheitas em agosto/2018 e agosto/2019, aos 217 e 258 DAA, respectivamente).

Marcelo (2018) afirma que o desbalanço de N influencia a qualidade tecnológica dos colmos. Desta forma, a autora que em condições de deficiência de N, decresce o teor de umidade da planta, com consequente redução na qualidade do caldo, aumento do teor de fibra, redução na concentração de sacarose nos colmos, acúmulo de sacarose nas folhas e alta relação colmo/folha. Quando há excesso de N, o mesmo é acumulado em excesso no colmo, redução da qualidade do caldo e atraso na maturação (CARNAÚBA, 1990). Por outro lado, diversos estudos não mostraram efeito da adubação nitrogenada na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar, sendo a adubação nitrogenada associada ao maior teor de umidade das plantas e maior produtividade (PEREIRA, 2011).

Neste estudo, observa-se que, de modo geral, a aplicação das diferentes fontes e doses de N não resultou em diferenças na qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar, podendo-se afirmar que não houve deficiência ou excesso de N nas plantas. Azeredo et al. (1986), Orlando Filho et al. (1994), Korndorfer et al. (1997) e Trivelin et al. (2002), obtiveram resultados semelhantes, onde, a adubação nitrogenada não afetou a qualidade tecnológica dos colmos. Sendo opostos aos de Silveira e Crocomo (1990), uma vez que constataram decréscimo no teor de sacarose em plantas que se desenvolveram em altas concentrações de N (20 kg ha⁻¹ de N no sulco de plantio + 450 kg ha⁻¹ cobertura com incorporação parcial).

Assim como observado neste estudo, Campanhão et al. (2005) verificaram que mesmo a adubação nitrogenada na soqueira da cana-de-açúcar não afetando a qualidade da matéria-prima, ela afetou a produtividade de colmos, e consequentemente a produtividade de açúcar. Assim sendo, nota-se que mesmo em casos onde não há efeito da adubação nitrogenada na qualidade da matéria prima, a mesma eleva a produtividade de colmos e açúcar, tornando o nutriente importante para a produtividade da cana-de-açúcar (RESENDE et al., 2006).

20 Índice de eficiência agronômica (IEA)

Na avaliação do IEA do experimento conduzido na Usina COFCO, observou-se que a somente a fonte Ureia líquida não apresentou maior eficiência que a fonte padrão Uran (Figuras 18 e 19). Sendo que as fontes Uran e 20% N + 4% Mg + 1% de Ca com eficiência 50% superior a fonte padrão Uran.

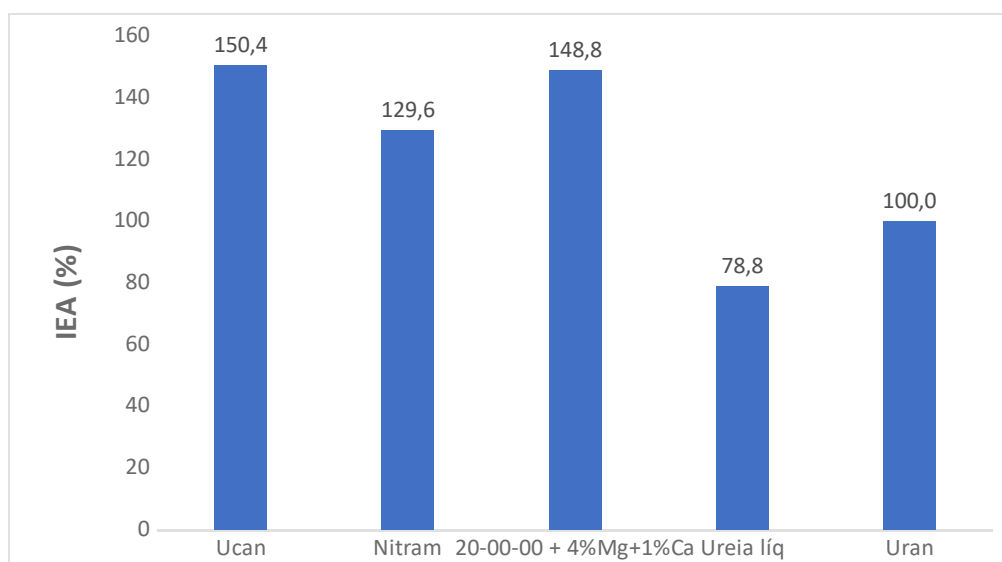


Figura 18. Índice de eficiência agrônômica (IEA) de diferentes fontes líquidas de N, em relação à fonte Uran na dose de 100 kg ha^{-1} de N, após dois anos de aplicação na soqueira da cana-de-açúcar (valores de TCH acumulados do 2º e do 3º corte, variedade CTC 9001, Usina COFCO, faz. Guarani, Sebastianópolis – SP, colheitas em agosto/2018 e maio/2019, aos 238 e 222 DAA, respectivamente).

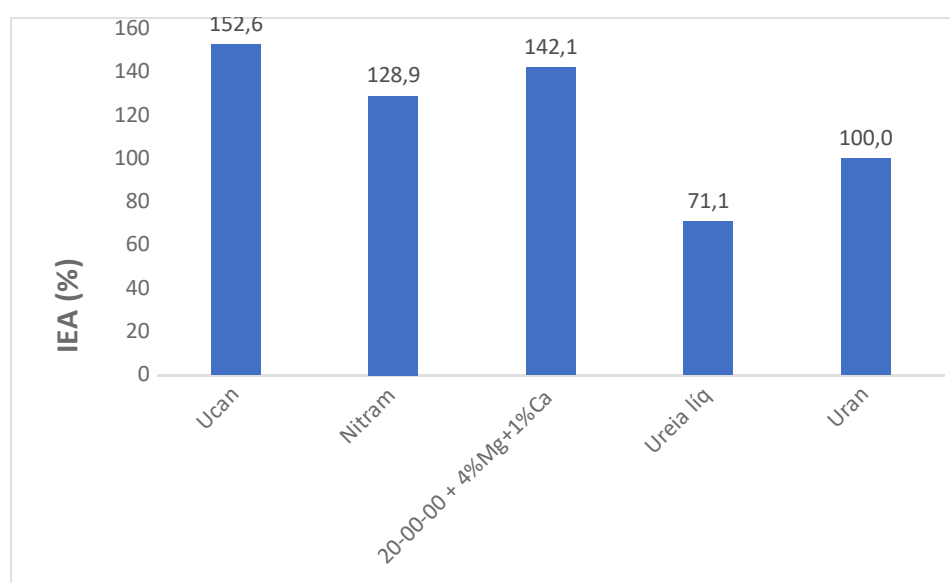


Figura 19. Índice de eficiência agrônômica (IEA) de diferentes fontes líquidas de N em relação à fonte Uran após dois anos de aplicação na soqueira da cana-de-açúcar (valores de TAH acumulados do 2º e do 3º corte, variedade CTC 9001, Usina COFCO, faz. Guarani, Sebastianópolis – SP, colheitas em agosto/2018 e maio/2019, aos 238 e 222 DAA, respectivamente).

Na Usina Açucareira Guaíra, nos valores de IEA para a variável TCH, observou-se a fonte Ureia líquida apresentando valores inferiores à fonte padrão Uran e as fontes Nitram e 20% N + 4% Mg + 1% Ca com aproximadamente 70% maior de eficiência em relação a mesma (Figura 20). Com relação a variável TAH a fonte Ucan e Ureia líquida

tiveram eficiência inferior a fonte padrão Uran, sendo 12,9 e 48,4% respectivamente (Figura 21).

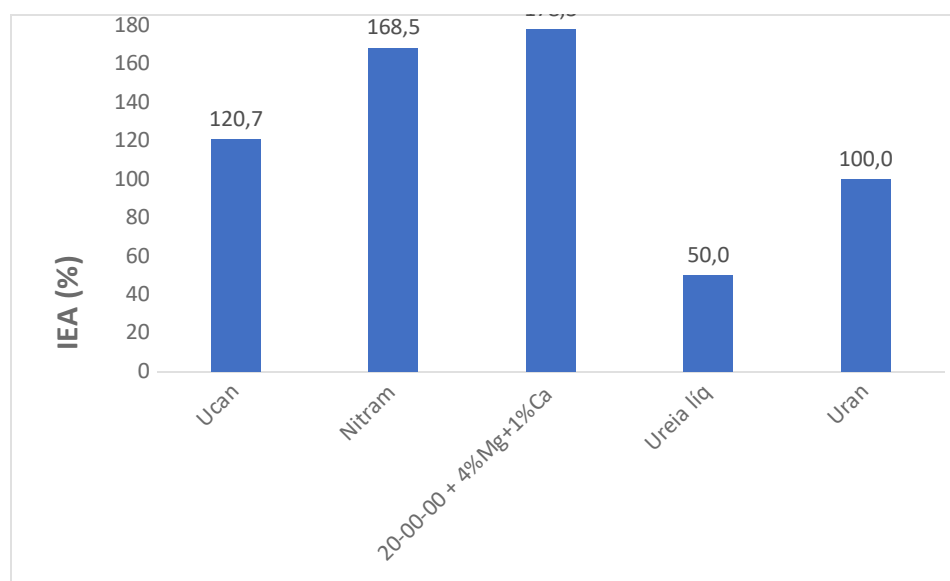


Figura 20. Índice de eficiência agrônômica (IEA) de diferentes fontes líquidas de N, em relação à fonte Uran após dois anos de aplicação na soqueira da cana-de-açúcar (valores de TCH acumulados do 2º e do 3º corte, variedade IAC 91-1099, Usina Guaira, faz. Capão da Onça, Guaira – SP, colheitas em outubro/2018 e novembro/2019, aos 271 e 329 DAA, respectivamente).

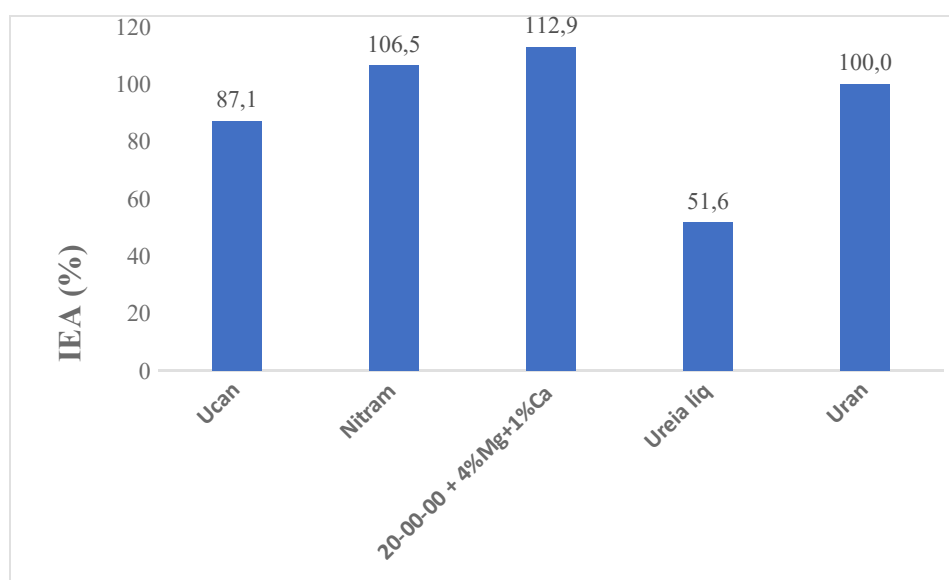


Figura 21. Índice de eficiência agrônômica (IEA) de diferentes fontes líquidas de N em relação à fonte Uran após dois anos de aplicação na soqueira da cana-de-açúcar (valores de TAH acumulados do 2º e do 3º corte, variedade IAC 91-1099, Usina Guaira, faz. Capão da Onça, Guaira – SP, colheitas em outubro/2018 e novembro/2019, aos 271 e 329 DAA, respectivamente).

Com os valores de IEA obtidos na Usina São Francisco, observou-se todas as fontes avaliadas obtiveram eficiência inferior à fonte padrão Uran, sendo a fonte Nitram com eficiência 14,7% menor para TCH e 9% para TAH (Figura 22 e 23).

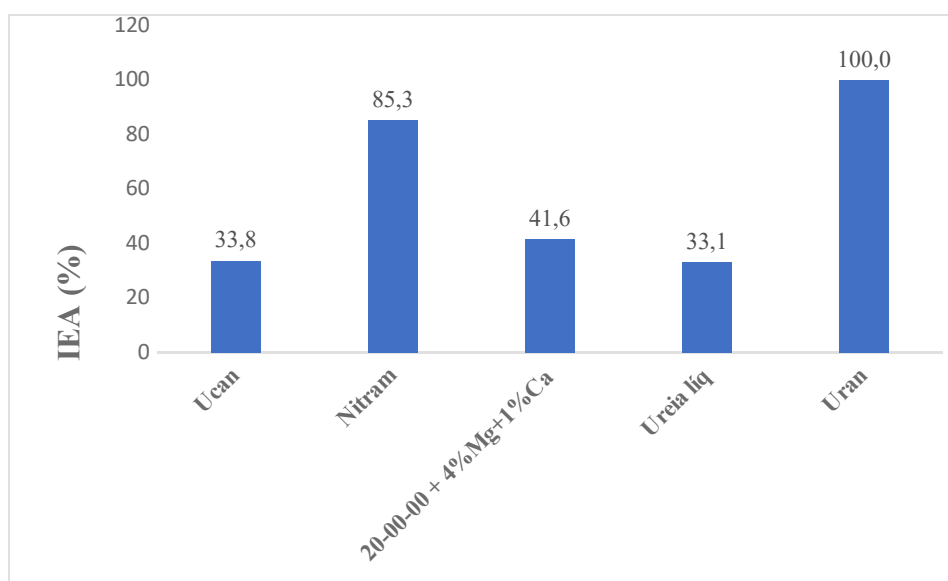


Figura 22. Índice de eficiência agrônômica (IEA) de diferentes fontes líquidas de N, em relação à fonte Uran após dois anos de aplicação na soqueira da cana-de-açúcar (valores de TCH acumulados do 2º e do 3º corte, Usina São Francisco, faz. Bela Vista – Sete Lagoas, Quirinópolis – GO, colheitas em agosto/2018 e agosto/2019, aos 217 e 258 DAA, respectivamente).

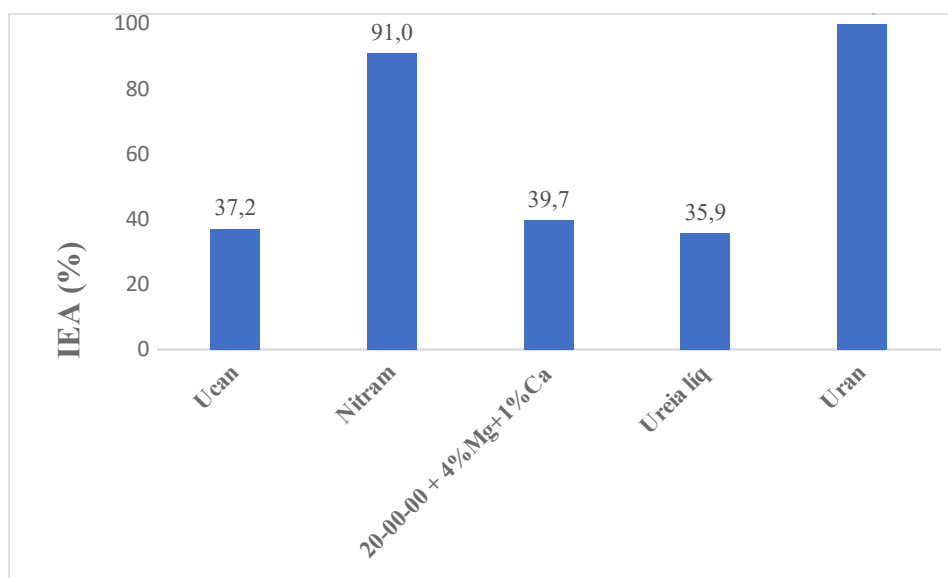


Figura 23. Índice de eficiência agrônômica (IEA) de diferentes fontes líquidas de N em relação à fonte Uran após dois anos de aplicação na soqueira da cana-de-açúcar (valores de TCH acumulados do 2º e do 3º corte, Usina São Francisco, faz. Bela Vista – Sete Lagoas, Quirinópolis – GO, colheitas em agosto/2018 e agosto/2019, aos 217 e 258 DAA, respectivamente).

De modo geral, observou-se menores índices de eficiência agronômica com a utilização da fonte ureia líquida. Conforme já mencionado, a aplicação da ureia fertilizante sobre a superfície dos resíduos vegetais pode favorecer perdas significativas de N (CANTARELLA et al., 1999). Assim sendo, perdas maiores resultam em menor aproveitamento do N pela planta, gerando menores produtividades.

6 CONCLUSÕES

As fontes líquidas e doses de N não afetaram a qualidade da matéria prima, sendo obtidos, de modo geral, resultados estatisticamente iguais, independente da fonte líquida e dose aplicada.

Analisando o índice de eficiência agronômica, a ureia líquida apresentou resultado inferior aos demais tratamentos, em todos os experimentos, sendo que os resultados foram na média 46% inferior à fonte Uran, quando analisada a produtividade acumulada de colmos e 47% na produtividade acumulada de açúcar.

A fonte Nitram apresentou os mais consistentes, considerando os três experimentos com incremento médio na produtividade acumulada de colmos de 27,8% e 8,8% na produtividade acumulada de açúcar em relação à fonte Uran. A fonte 20% N + 4% Mg + 1% Ca, apresentou os maiores resultados absolutos, sendo acrescidos a produtividade acumulada de colmos 78,3% na Usina Açucareira Guaíra e 42,1% a produtividade acumulada de açúcar na Usina COFCO *International*.

Na avaliação das doses crescentes de Ucan, a produtividade acumulada de colmos por hectare máxima, 256, foi obtida com a aplicação da dose 63 kg ha⁻¹ de N, no experimento conduzido na Usina Açucareira Guaíra. Com relação à produtividade de açúcar, a máxima acumulada também foi obtida na Usina Açucareira Guaíra, obtendo-se 43 TAH na dose de 68 kg ha⁻¹ de N.

Com relação as doses crescentes de Uran, a produtividade acumulada de colmos por hectare máxima, 171, foi obtida com a aplicação da dose de 95 kg ha⁻¹ de N, no experimento conduzido na Usina COFCO *International*. Com relação a produtividade de açúcar, a máxima acumulada foi obtida no experimento conduzido na Usina São Francisco, obtendo-se 27 TAH, na dose de 93 kg ha⁻¹ de N.

REFERÊNCIAS

AZEREDO, D. F.; BOLSANELLO, J.; WEBER, H.; VIEIRA, J. R. Nitrogênio em cana-planta – doses e fracionamento. **STAB**, Piracicaba, SP, v. 6, p. 26-33, 1986.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia.

Competitividade do gás natural: estudo de caso na indústria de fertilizantes nitrogenados. Brasília, DF: Empresa de Pesquisa Energética, 2019. Disponível em: http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/EPE-DEA-IT-01-19%20-%20GN_Fertilizantes.pdf Acesso em: 15 dez. 2019.

CAMPANHÃO, J. M.; BARBOSA, V.; DURIGAN, A. M. P. R.; MUTTON, M. A. Manejo da soqueira da cana-de-açúcar submetida a queima acidental da palhada remanescente da colheita mecanizada. **STAB**, Piracicaba, SP, v. 23, n. 4, p. 33- 37, mar./abr. 2005.

CANTARELLA, H. Adubação nitrogenada em sistema de cana crua. **STAB**, Piracicaba, SP, v. 16, n. 4, p. 21-22, mar./abr. 1998.

CARNAÚBA, B. A. A. O nitrogênio e a cana-de-açúcar. **STAB**, Piracicaba, SP, v. 8, n. 3/4, p. 24-41, 1990.

CASAGRANDE, A. A. Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar. **Jaboticabal: Funep**, Jaboticabal, SP, v. 3, n. 5, p. 157, 1991.

CHAPMAN, L. S.; HOGARTH, D. M.; LEVERINGTON, K. C. Does nitrogen fertilizer carry over to succeeding crops? *In*: AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONGRESS, 22., 1983, Brisbane. **Proceedings** [...]. Brisbane: Watson Fergunson, 1983. p. 109-114.

DENMEAD, O. T.; FRENEY, J. R.; JACKSON, A. V.; SMITH, J. W. B.; SAFFIGNA, P. G.; WOOD, A. W.; CHAPMAN, L. S. Volatilization of ammonia from urea and ammonium sulfate applied to sugarcane trash in North Queensland. **Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists**, Austrália, v. 12, p. 73-78, 1990.

ESPERANCINI, M. S. T.; AFONSO, P. F. N.; GAVA, G. J. C.; VILLAS BOAS, R. L. Dose ótima econômica de nitrogênio em cana-de-açúcar aplicada via fertirrigação por gotejamento. **Irriga**, Botucatu, p. 28-39. Edição especial. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2015v1n1p28>. Disponível em: <http://200.145.140.50/index.php/irriga/article/view/1971>. Acesso em: 04 nov. 2019

GUALBERTO, C. A. C.; SANTOS, G. A.; KORNDORFER, G. H. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar na região do Cerrado. *In*: FLORES, R. A.; CUNHA, P. P.; MARCHÃO, R. L. **Nutrição e adubação de grandes culturas na região do Cerrado**. Goiânia: Gráfica Ufg, 2019. p. 120-135.

KORNDÖRFER, G. H.; VALLE, M. R.; MARTINS, M.; TRIVELIN, P. C. O. Aproveitamento do nitrogênio da uréia pela cana planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, n. 1, p. 23-26, 1997.

KRISTENSEN, H. L.; THORUP-KRISTENSEN, K. Uptake of ¹⁵N labeled nitrate by root systems of sweet corn, carrot and white cabbage from 0.2 to 2.5 meters depth. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 265, p. 93–100, ago. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-005-0696-y>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-005-0696-y>. Acesso em: 04 nov. 2019.

JARREL, W. M.; BEVERLY, R. B. The Dillution Effect in Plant Nutrition Studies. **Advances in Agronomy**, United States, v. 34, p. 197-224, 1981. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60887-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60887-1). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211308608871>. Acesso em: 04 nov. 2019.

LARA-CABEZAS, W. A. R.; TREIVELIN, P. C. O.; KORNDORFER, G.; PEREIRA, G. H. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluída de cobertura na cultura de milho, em sistema de plantio direto no triangulo mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 363-476, abr./jun. 2000. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06832000000200014&script=sci_arttext. Acesso: 04 nov. 2019.

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

MANHÃES, C. M. C.; GARCIA, R.; FRANCELINO, F.; FRANCELINO, H.O.; COELHO, F. Factors that affect sprouting and tillering of sugar cane. **Revista Vértices**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 163-181, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5935/1809-2667.20150011>. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Fatores-que-afetam-a-brota%C3%A7%C3%A3o-e-o-perfilhamento-da-Manh%C3%A3es-Garcia/bbafd5d2b867720e97088973ad49932b10844d9b?p2df>. Acesso em: 04 nov. 2019.

MARCELO, D. N. **Efeitos de fontes e doses de nitrogênio em soqueira de cana-de-açúcar, cultivar sp79-1011**. 2008. 55 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

MARCHESAN, E.; GROHS, M.; SANTOS, D. S.; FORMENTINI, T. C.; SILVA, L. S.; SARTORI, G. M. S.; FERREIRA, R. B. Fontes alternativas à ureia no fornecimento de nitrogênio para o arroz irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 12, p. 2053-2059, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0103-84782011001200003>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-84782011001200003&script=sci_arttext. Acesso em: 04 nov. 2019.

ORLANDO FILHO, J.; RODELLA, A. A.; BELTRAME, J. A.; LAVORENTI, N. A. Doses, fontes e formas de aplicação de nitrogênio em cana-de-açúcar. **STAB**, Piracicaba, SP, v. 17, n. 4, p. 39-41, mar./abr. 1999.

ORLANDO FILHO, J.; CARMELLO, Q. A. C.; PEXE, C. A.; GLÓRIA, A. M. Adubação de soqueiras de cana-de-açúcar sob dois tipos de despalha: cana crua x cana queimada. **STAB**, Piracicaba, SP, v. 1, p. 7-11, 1994.

ORLANDO FILHO, J; ZAMBELLO, JUNIOR, E. Influência varietal na adubação nitrogenada em soqueiras de cana-de-açúcar. **Boletim técnico Planalsucar**. Piracicaba, v. 1, n. 1, p. 25-50, 1979.

PENATTI, C. P. **Adubação da cana-de-açúcar - 30 anos de experiência**. 1. ed. Itu, SP: Ottoni, 2013. 347 p.

PEREIRA, W. **Produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar inoculada com bactérias diazotróficas**. 2011. 54 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2011.

PRADO, R. M.; PANCELLI, M. Resposta de soqueiras de cana-de-açúcar em sistema de colheita sem queima à aplicação de nitrogênio. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 4, p. 951-959, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0006-87052008000400018>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0006-87052008000400018&script=sci_abstract&tlng=es. Acesso em: 04 nov. 2019.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. rev. e atual. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RESENDE, A. S.; SANTOS, A.; XAVIER, R. P.; COELHO, C. H.; GONDIM, A.; OLIVEIRA, O. C.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA. Efeito da queima da palhada da cana-de-açúcar e de aplicações de vinhaça e adubo nitrogenado em características tecnológicas da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 937-941, nov./dez. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000600003>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832006000600003. Acesso em: 04 nov. 2019.

SOBRAL, A. F.; LIRA, L. J. A. Adubação nitrogenada em cana-de-açúcar no nordeste do Brasil. **STAB**, Piracicaba, v. 1, n. 5, p. 29-34, maio/ jun. 1983.

SILVEIRA, J. A. G.; CROCOMO, O. J. Assimilação de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em presença de elevado nível de N e de vinhaça no solo. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Campinas, v. 2, p. 7-15, 1990.

STOLF, R. Metodologia de avaliação de falhas nas linhas de cana-de-açúcar. **STAB**, Piracicaba, v. 4, n. 6, p. 22-36, jul./ago.1986.

SYSTAT SOFTWARE. **SigmaPlot statistics user's guide, version 11.2**. San Jose, Costa Rica: Systat Software, Inc., 2009.

TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, M. W.; VITTI, A. C.; GAVA, G. J. C.; BENDASSOLLI, J. A. Nitrogen losses of applied urea in the soil-plant system during two sugarcane cycles. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 2, p. 193-201, fev. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002000200011>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-204X2002000200011&script=sci_arttext&tlng=pt. Acesso em: 04 nov. 2019.

VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. C.; FRANCO, H. C. J.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada à localização de adubos nitrogenados aplicados sobre os resíduos culturais em canavial sem queima. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 491-498, maio/jun. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000300009>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06832007000300009&script=sci_arttext&tlng=pt. Acesso em: 04 nov. 2019.

TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C.; OLIVEIRA, M. W.; GAVA, G. J. C.; SARRIÉS, G. A. Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana-planta) em solo arenoso com incorporação de resíduo da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 637-646, 2002. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180218340008>. Acesso em: 04 nov. 2019.

WEBER, H.; OLIVEIRA, R.A.; DAROS, E.; ZAMBON, J.L.C.; IDO, O.T.; ZUFFELLATO-ROBAS, K.C.; KOEHLER, H.S.; SILVA, D.K.T. Crescimento e desenvolvimento de três cultivares de cana-de-açúcar, em cana-planta, no estado do Paraná: Taxas de crescimento. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 1, n. 5, p. 87-94, abr. 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v6i1.4599>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/agraria/article/view/4599>. Acesso em: 04 nov. 2019.

CAPÍTULO III

RESUMO

SILVEIRA, LUIZ HENRIQUE. **Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar por imagens multiespectrais**. Uberlândia: UFU, 2020. 40 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

Com a popularização de sensores multiespectrais no setor agrícola, diversas possibilidades referentes à sua utilização têm surgido. Com o intuito de gerar uma importante ferramenta para agricultura de precisão, objetivou-se estimar a produtividade da cana-de-açúcar em áreas experimentais, utilizando imagens multiespectrais obtidas por VANT (SX2, Sensix®) embarcado com câmera multiespectral (MicaSense®) e associadas aos pesos coletados em campo. Para isto, foram instalados três experimentos, nas Usinas COFCO *International*, Usina Açucareira Guaíra e Usina São Francisco. Os experimentos tiveram duas safras de duração (2017/2018 e 2018/2019) instalados em delineamento de blocos casualizados com quatro repetições, sendo cada parcela composta por cinco linhas de cana-de-açúcar com 10 m de comprimento e espaçadas 1,5 m entre si. Foram aplicadas doses crescentes de nitrogênio (N), (33, 66, 100 e 133 kg ha⁻¹) provenientes das fontes Ucan (23% N + 4% Ca) e Uran (23% N), bem como as fontes Nitram (20% N), 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca e Ureia líquida (20% N) na dose 100 kg ha⁻¹ de N. Os voos foram realizados aproximadamente 90 dias após aplicação dos fertilizantes com altura de voo padronizada em 120 m. Em cada parcela experimental, foram calculados índices de vegetação e o descritor de imagens momentos invariantes de Hu foi utilizado com a finalidade de reconhecer os padrões existentes dentro das imagens. Realizou-se regressão linear para estimar o peso em função dos descritores e seus respectivos pesos obtidos em campo. O melhor resultado foi obtido quando o peso das parcelas foi padronizado para toneladas de cana por hectare e utilizado todos os experimentos no mesmo treinamento, obtendo R² de 0,6.

CHAPTER III

ABSTRACT

SILVEIRA, LUIZ HENRIQUE. **Estimation of sugarcane productivity by multispectral imaging.** Uberlândia: UFU, 2020. 40p. Dissertation (Master in Agronomy/Soils – Federal University of Uberlândia).

With the popularization of multispectral sensors in the agricultural sector, several possibilities regarding their use have arisen. With the aim of generating an important tool for precision farming, this study aimed to estimate the productivity of sugar cane in experimental areas, using multispectral imaging obtained by VANT (SX2 Sensix®) shipped with multispectral camera (MicaSense®) and associated with the weights collected in the field. For this, three experiments were installed in the production areas of the COFCO International plants, Guaíra Sugar Mill and São Francisco Power Plant. The experiments had two seasons of duration (2017/2018 and 2018/2019) and were installed in the delineation of randomized blocks with four repetitions, each parcel consisting of five sugarcane lines 10 m long and spaced 1.5 m apart. Increasing doses of nitrogen (N), (33, 66, 100 and 133 kg ha⁻¹) from Ucan (23% N + 4% Ca) and Uran (23% N) sources were applied, as well as Nitram (20% N), 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca and liquid Urea (20% N) in the 100 kg ha⁻¹ dose of N. The flights were performed approximately 90 days after fertilizer application, with standard flight height of 120 m. In each experimental plot, vegetation indexes were calculated and the descriptor of invariant moments of Hu images was used in order to recognize the existing patterns within the images. Linear regression was performed to estimate the weight as a function of the descriptors and their respective weights obtained in the field. The best result was obtained when the weight of the plots was standardized for tons of cane per hectare and used all experiments in the same training, obtaining R² of 0.6.

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é vista como uma grande alternativa ao setor de biocombustíveis devido ao enorme potencial na produção de etanol e seus subprodutos. Aliada à produção de etanol e açúcar, as unidades produtoras, ou usinas, buscam aumentar a eficácia na geração de energia elétrica, podendo ofertar energia às companhias elétricas, elevando a sustentabilidade do setor. De modo geral, as indústrias brasileiras operam em um cenário de sustentabilidade, correspondendo às preocupações relativas ao meio ambiente e aos efeitos prejudiciais na utilização de combustíveis fósseis. Desta forma, o Brasil que é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com uma produção estimada para a safra 2019/2020 de 622,3 milhões de toneladas em uma área colhida de 8,38 milhões de hectares (CONAB, 2019), tornando-se extremamente competitivo na comercialização de etanol.

Com a finalidade de municiar os tomadores de decisões, se fazem necessárias análises da dinâmica da cana-de-açúcar, tais quais área plantada, área colhida, áreas de expansão e produção (MULIANGA et al., 2015). A extensão territorial brasileira produtiva com cana-de-açúcar carece de informações específicas e detalhadas no que diz respeito à produção desta cultura. Dessa forma, técnicas de sensoriamento remoto surgem como uma alternativa, pois contribuem para obtenção de informações mais precisas e representativas (SCHULTZ et al., 2016), além de permitir a obtenção destes dados em tempo adequado e custos mais baixos.

A combinação das técnicas de sensoriamento remoto com algoritmos de classificação e modelos para predição de produção oportunamente é utilizada para obtenção de parâmetro, e facilitam o monitoramento e análise de desenvolvimento da cultura (MOREL et al., 2014; ROBSON et al., 2016). Rahman e Robson (2016) combinaram uma série de imagens do satélite Landsat com algoritmos para prever a produtividade da cana-de-açúcar. Imagens digitais da lavoura também podem ser utilizadas para avaliar o dinamismo da cobertura do solo e auxiliar no monitoramento de culturas agrícolas por proporcionar imagens com múltiplas resoluções espaciais e temporais. Estas avaliações podem ser feitas por vários métodos de classificação de dados e imagens. Recentemente, a utilização de métodos de classificação associados aos algoritmos de aprendizado de máquina tem sido amplamente utilizada para classificar áreas agrícolas em aplicações de dados de sensoriamento remoto (DARA, et al., 2018; PICOLI et al., 2018).

Estes dados obtidos por ferramentas do sensoriamento remoto, ainda podem ser associados com variáveis agronômicas e climáticas (ANDRADE et al., 2014; PICOLI et al., 2009) a fim de se modelar a produção da cana-de-açúcar. A modelagem para estimar a produção agrícola pode ser feita através de técnicas estatísticas convencionais, como por equações de regressão e correlação. Diversos trabalhos realizados demonstram que a utilização de técnicas avançadas de modelagem (redes neurais artificiais) para estimar a produção agrícola apresentam resultados mais satisfatórios do que as técnicas convencionais (BOCCA; RODRIGUES, 2016). Apesar desta importância, a análise combinada de dados provenientes do sensoriamento remoto com variáveis agronômicas que visam estimar a produção da cana-de-açúcar, necessita de mais estudos para elevar a acurácia das estimativas.

Diante disso, objetivou-se estimar a produtividade da cana-de-açúcar a partir de índices de vegetação aplicados ao descritor de imagens momentos invariantes de Hu, realizando aprendizado de máquina no software Weka. Assim, foram fornecidos dados (pesos) conhecidos de áreas previamente demarcadas em campo.

1 MATERIAL E MÉTODOS

21 Áreas experimentais

Os experimentos tiveram duração de duas safras agrícolas (2017/2018 e 2018/2019), sendo instalados em três usinas: COFCO *International*

(Sebastianópolis/SP), Usina Açucareira Guaíra (Guaíra/SP) e Usina São Francisco (Quirinópolis/GO).

De acordo com a classificação internacional de Köppen, as três regiões predominam o clima do tipo Aw, ou seja, tropical quente e úmido com inverno frio e seco, sendo, de modo geral, os meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março são os mais chuvosos e os meses de junho, julho e agosto são os mais secos.

22 Delineamento experimental

Os experimentos foram instalados num esquema de delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições sendo os tratamentos baseados em fontes e doses de N, de acordo com a tabela 1.

Tabela 1. Doses e produtos utilizados em cada tratamento.

| Tratamentos | Dose de N (kg ha ⁻¹) |
|--------------------------|----------------------------------|
| Testemunha | 0 |
| Ucan | 33 |
| Ucan | 66 |
| Ucan | 100 |
| Ucan | 133 |
| Uran | 33 |
| Uran | 66 |
| Uran | 100 |
| Uran | 133 |
| Nitram | 100 |
| 20-00-00 + 4% Mg + 1% Ca | 100 |
| Ureia líquida | 100 |

Ucan: 23-00-00 + 4% Ca; Uran: 32-00-00; Nitram: 20-00-00; Ureia líquida: 20-00-00.

A fonte Ucan apresenta 23% N, enquanto as fontes Uran, Nitram e Ureia líquida apresentam 32, 20 e 20% de N, respectivamente.

As parcelas constituíram-se de 5 linhas de cana-de-açúcar com 10 m de comprimento, sendo espaçadas 1,5 m entre si (Figura 1). Logo, cada parcela experimental continha área de cultivo de 75 m², e adotou-se um espaçamento de 3 m nas cabeceiras. Com isso, a área total do experimento foi de 6420 m².



Figura 1. Parcela experimental constituída por 5 linhas de cana-de-açúcar com 10 m de comprimento e espaçadas 1,5 m entre si (área útil: 75m²)

23 Instalação do experimento

Os tratamentos foram aplicados via solo, logo depois do corte anterior da cana-de-açúcar. Para tal, foi utilizado pulverizador costal e cilindro pressurizado à CO₂, com a aplicação direcionada para a rebrota da soqueira.

Para cada experimento, seguiu-se a recomendação de cada unidade produtora: variedade plantada, aplicação de fósforo (60 kg ha⁻¹ P₂O₅ - SFT) e potássio (140 kg ha⁻¹ de K₂O - KCl). Na Usina COFCO a variedade plantada foi CTC 9001 que apresenta boa adaptabilidade à colheita mecanizada, elevado teor de açúcar total recuperável e precocidade em ambiente restritivo (CTC, 2018). Na Usina Açucareira Guaira, utilizou-se a variedade SP IAC-91-1099, que apresenta boa brotação de soqueiras, excelente fechamento de entrelinhas, sendo indicada para ambientes médio-favoráveis (SOCICANA, 2012) enquanto que na Usina São Francisco a variedade CTC 4 foi utilizada, a qual apresenta elevada produtividade, boa adaptabilidade ao plantio mecanizado e excelente perfilhamento (CTC, 2018).

24 Obtenção e processamento das imagens

As imagens foram obtidas aproximadamente 90 dias após a aplicação dos tratamentos. Para tal, foi utilizada ARP da empresa Sensix® (SX2) embarcada com sensor multiespectral Micasense-RedEdge™, padronizando 120 m de altura de voo.

O processamento das imagens se deu pela plataforma online Fieldscan® (Sensix), onde as imagens são enviadas para processamento em nuvem e é feita a confecção do ortomosaico georreferenciado (Figura 2), possibilitando também o acesso a zonas de manejo e índices de vegetação.



Figura 2. Apresentação da plataforma de processamento de imagens FieldScan – Sensix.

Posteriormente, com os ortomosaicos georreferenciados, foram gerados os índices de vegetação utilizando a ferramenta calculadora raster (Figura 3). Também foram criados arquivos shapefile de cada área de interesse em cada parcela experimental, utilizando a função o software livre Qgis (Figuras 4, 5 e 6). Os arquivos foram utilizados como moldes para calcular os índices de vegetação somente nas áreas de interesse, utilizando a função recortar raster pela camada máscara do Qgis (Figura 7).

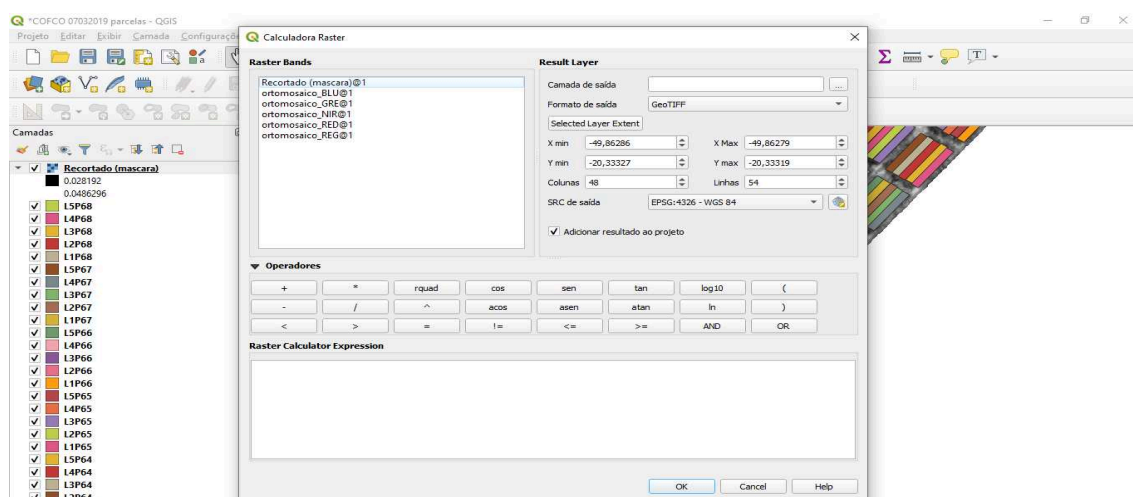


Figura 3. Função calculadora raster, disponível no software Qgis.

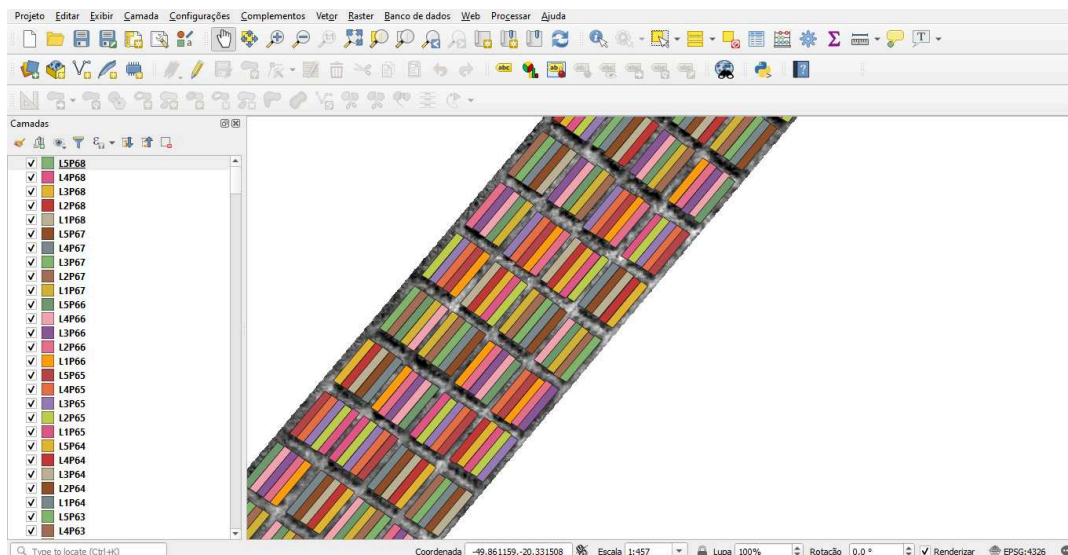


Figura 4. Tela do software Qgis, experimento conduzido na Usina COFCO – Sebastianópolis/SP. Shapefile sobrepondo cada uma das cinco linhas da parcela experimental (área colhida – 75 m²).

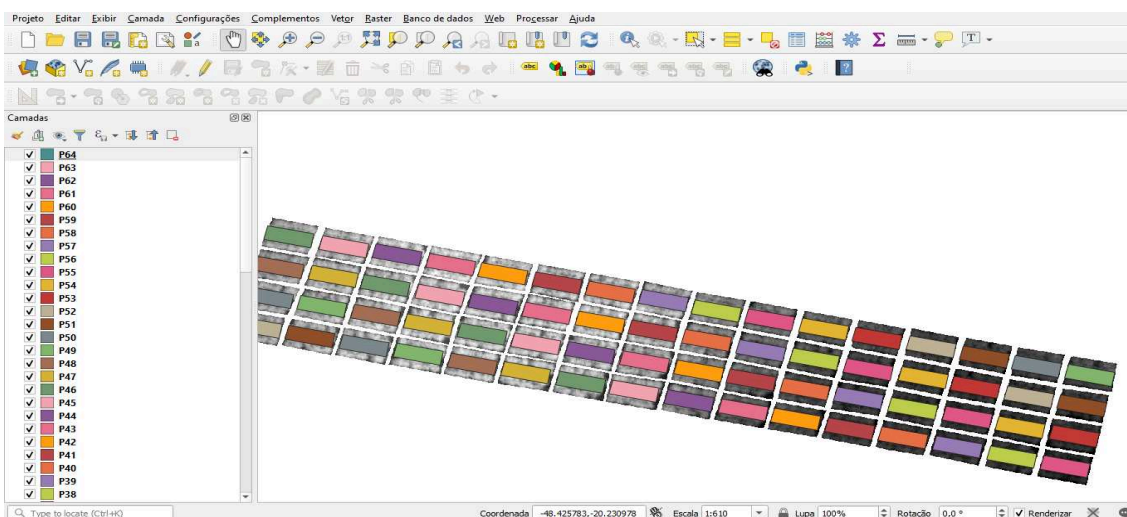


Figura 5. Tela do software Qgis, experimento conduzido na Usina Açucareira Guaíra – Guaíra/SP. Shapefile sobrepondo as três linhas centrais (área colhida – 45 m²).

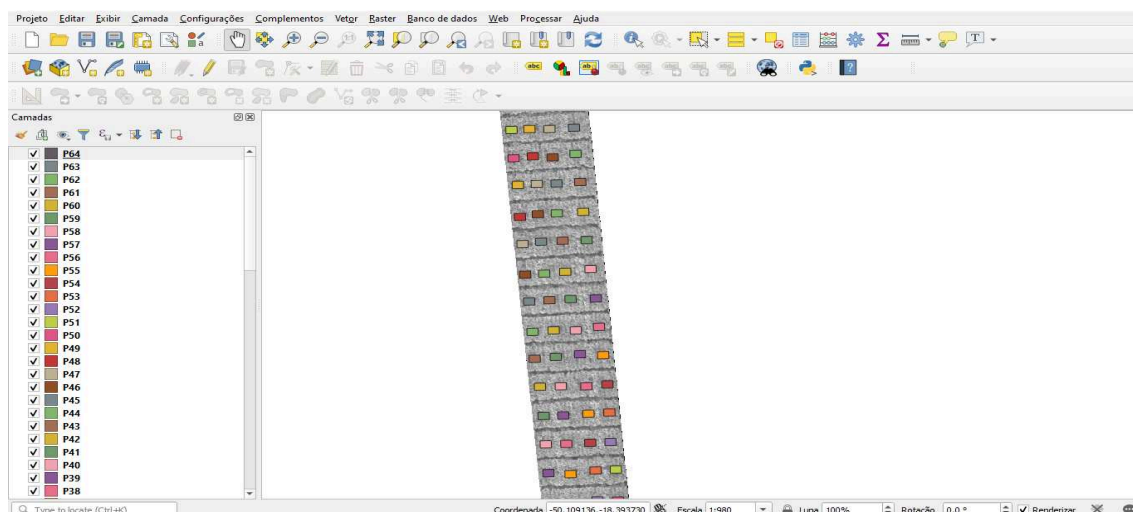


Figura 6. Tela do software Qgis, experimento conduzido na Usina São Francisco – Quirinópolis/GO. Shapefile sobrepondo a parte central das três linhas centrais (área colhida – 13,5 m²).

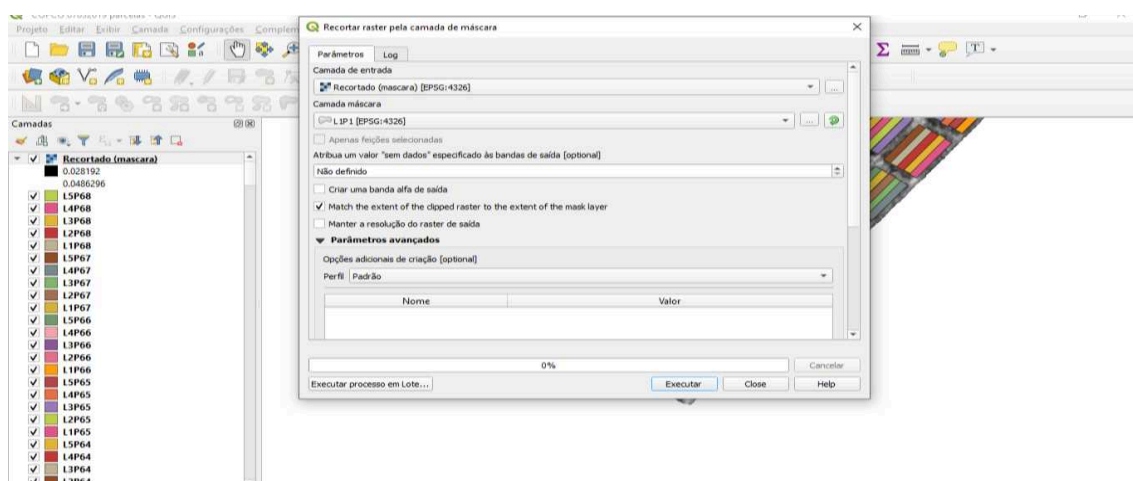


Figura 7. Função recortar raster pela camada de máscara, disponível no software Qgis.

A data de colheita variou conforme planejamento da usina. Desta forma, houve variação no número de dias entre a obtenção das imagens e as colheitas, conforme apresentado na tabela 2.

Tabela 2. Número de dias entre obtenção das imagens e colheita

| Usina | 2017/2018 | 2018/2019 |
|----------------------------|-----------|-----------|
| Açucareira Guaíra | 166 | 258 |
| COFCO <i>International</i> | 148 | 118 |
| São Franciscok | 113 | 160 |
| Média | 142 | 179 |

25 Obtenção do peso das parcelas experimentais

A produtividade da cana-de-açúcar foi obtida após a pesagem em cada parcela, posteriormente convertendo os pesos obtidos para $t\ ha^{-1}$. Na Usina COFCO, o peso da parcela foi obtido pela pesagem individual de cada uma das 5 linhas da parcela experimental ($75m^2$), por colhedora mecanizada e caminhão balança (Figura 8). Na Usina Açucareira Guaira, realizou-se a pesagem das 3 linhas centrais de cada parcela ($45\ m^2$) com auxílio de uma carregadeira equipada com balança (Figura 9). Por fim, a produtividade do experimento instalado na Usina São Francisco foi determinada pela pesagem de 3 m das 3 linhas centrais ($13,5\ m^2$), com ausência de falha de brotação, através de um tripé de sustentação acoplado à uma balança (Figura 10).



Figura 8. Pesagem da cana-de-açúcar com o auxílio de uma célula de carga acoplada ao transbordo (Usina COFCO *International*. Sebastianópolis/SP).

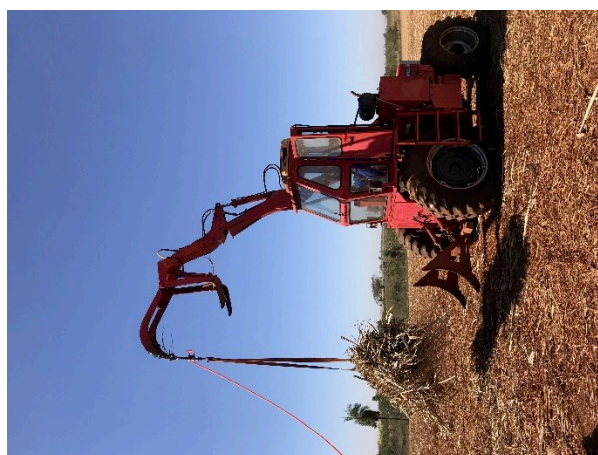


Figura 9. Pesagem da cana-de-açúcar com o auxílio de uma célula de carga acoplada à carregadeira (Usina Açucareira Guaíra. Guaíra/SP)



Figura 10. Pesagem da cana-de-açúcar com o auxílio de um tripé equipado com uma balança. (Usina São Francisco. Quirinópolis/GO).

26 Momentos invariantes de Hu

O cálculo dos momentos invariantes de Hu foi realizado no software Matlab através da função:

Calculation of various invariant Hu's moments

```
inv_moments(1) = eta(3,1) + eta(1,3);
inv_moments(2) = (eta(3,1) - eta(1,3))^2 + (4*eta(2,2)^2);
inv_moments(3) = (eta(4,1) - 3*eta(2,3))^2 + (3*eta(3,2) - eta(1,4))^2;
inv_moments(4) = (eta(4,1) + eta(2,3))^2 + (eta(3,1) + eta(1,4))^2;
inv_moments(5) = (eta(4,1) - 3*eta(2,3))*(eta(4,1) + eta(2,3))*((eta(4,1) + eta(2,3))^2 - 3*((eta(3,2) + eta(1,4))^2)) + (3*(eta(3,2) - eta(1,4)))*(eta(3,2) + eta(1,4))*(3*(eta(4,1) + eta(2,3))^2 - (eta(3,2) + eta(1,4))^2);
inv_moments(6) = (eta(3,1) - eta(1,3))*((eta(4,1)+eta(2,3))^2 - (eta(3,2)+eta(1,4))^2) + 4*eta(2,2)*((eta(4,1) + eta(2,3))*(eta(3,2) + eta(1,4)));
inv_moments(7) = (3*eta(3,2) - eta(1,4))*(eta(4,1) + eta(2,3))*((eta(4,1) + eta(2,3))^2 - 3*(eta(3,2)-eta(1,4))^2) - (eta(4,1) - 3*eta(2,3))*(eta(3,2) + eta(1,4))*(3*(eta(4,1) + eta(2,3))^2 - (eta(3,2) + eta(1,4))^2).
```


27 Análises Weka

O objetivo do WEKA é agregar diversos algoritmos de diversas áreas da inteligência artificial, se dedicando ao estudo do aprendizado de máquina. Para isto, desenvolve algoritmos e técnicas que permitam o computador obter conhecimento para gerar hipóteses futuras.

O WEKA necessita que os dados sejam apresentados de forma organizada em planilha ou banco de dados. Existe um arquivo com formato padrão, cuja sua extensão é ARFF, sendo sua organização apresentada a seguir (Figura 11):

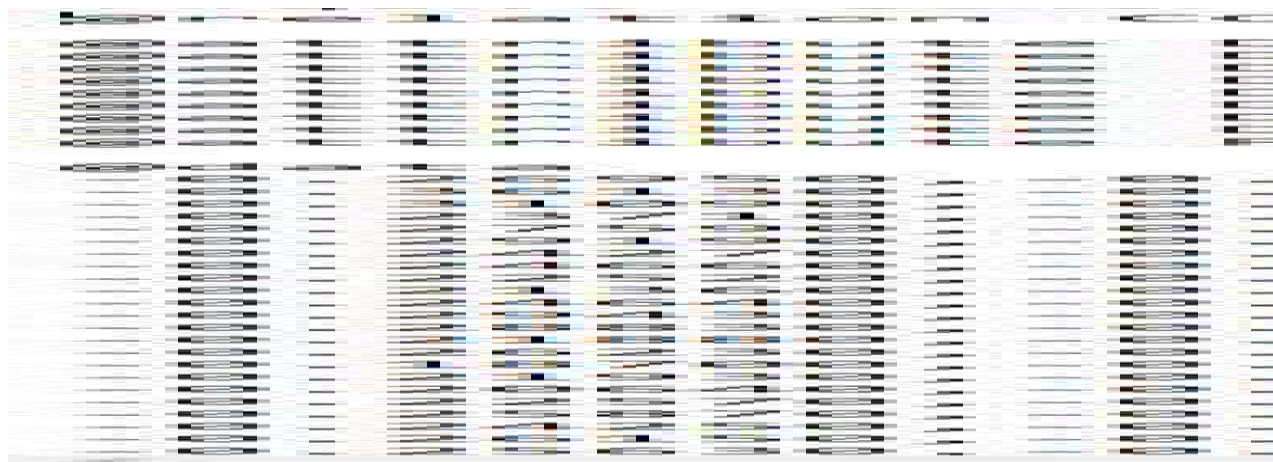


Figura 11: Estrutura de arquivo aceito pelo WEKA.

O arquivo é dividido em duas partes. Na primeira, é apresentado o nome dos atributos (`@relation`), logo após são apresentados os nomes dos atributos (`@attribute`) e seu formato, no exemplo são dados numéricos. A seguir os dados são apresentados através da nomenclatura `@data`, seguindo a sequência apresentada em `@attribute`.

28 Índices de vegetação

Foram calculados e recortados os índices de vegetação de cada parcela experimental, utilizando as funções da calculadora raster e cortador, respectivamente do software livre Qgis. Os índices de vegetação e suas respectivas fórmulas são apresentadas a seguir.

1.1.1 Índice de folhas verdes (GLI)

Índice projetado inicialmente para uso com câmera RGB, para avaliar a cultura do trigo.

$$\text{Equação 1: } GLI = \frac{(\rho_{\text{verde}} - \rho_{\text{vermelho}}) + (\rho_{\text{vermelho}} - \rho_{\text{infravermelho}})}{(2 * \rho_{\text{vermelho}}) + \rho_{\text{infravermelho}}}$$

Os valores variam de -1 a +1. Valores negativos apresentam solo exposto ou sem vida, enquanto as positivas representam material vegetal ativo (Louhaici; Borman; Johnson; 2001). Sendo *Green* (495 – 570 nm) o comprimento de onda refletido no espectro do verde e *Red* (620 – 750 nm) no espectro do vermelho.

1.1.2 Índice de vegetação com diferença normalizada no verde (GNDVI)

Índice semelhante ao NDVI, mas mede o espectro verde (540 a 570 nm) ao invés do espectro vermelho. Com isto ele se torna mais sensível a concentração de clorofila, quando comparado ao NDVI (Gitelson; Merzlyak; 1998)

$$\text{Equação 2: } GNDVI = \frac{(NIR - \rho_{\text{verde}})}{(NIR + \rho_{\text{verde}})}$$

1.1.3 IV Ajustado ao Solo Otimizado para Verde (GOSAVI)

Índice projetado inicialmente para prever a necessidade de nitrogênio para o milho (Sripada et al., 2005). Sendo NIR (*Near InfraRed*), o infravermelho próximo (800 a 2400 nm).

$$\text{Equação 3: } GOSAVI = \frac{(NIR - \rho_{\text{verde}})}{(NIR + \rho_{\text{verde}} + 0,16)}$$

1.1.4 Índice de vegetação com proporção verde (GRVI)

Índice sensível às taxas fotossintéticas apresentadas no dossel da vegetação, uma vez que a reflectância apresentada em verde e vermelho são fortemente influenciadas por alterações nos pigmentos das folhas (Sripada et al., 2006).

$$\text{Equação 4: } GRVI = \frac{NIR}{\rho_{\text{vermelho}}}$$

1.1.5 Índice da diferença normalizada na banda vermelho (NDRE)

Índice atualmente muito utilizado e semelhante ao GNDVI, com a diferença da utilização do espectro do vermelho próximo (BARNES et al., 2000). Sendo Red Edge, a borda do espectro vermelho (690 a 730 nm)

$$\text{Equação 5: } NDRE = \frac{(NIR - REDEGE)}{(NIR + REDEGE)}$$

1.1.6 Índice de Vegetação por Diferenças Normalizadas (NDVI)

Este índice diferencia a vegetação saudável e verde. Sua combinação, devido ao uso das regiões de absorção e reflectância mais altas da clorofila tornam apta sua utilização em uma gama de condições. Entretanto, pode saturar em vegetações densas em que o índice de área foliar é alto (ROUSE et al., 1973).

$$\text{Equação 6: } NDVI = \frac{(NIR - \textcolor{red}{i})}{(NIR + \textcolor{red}{i})}$$

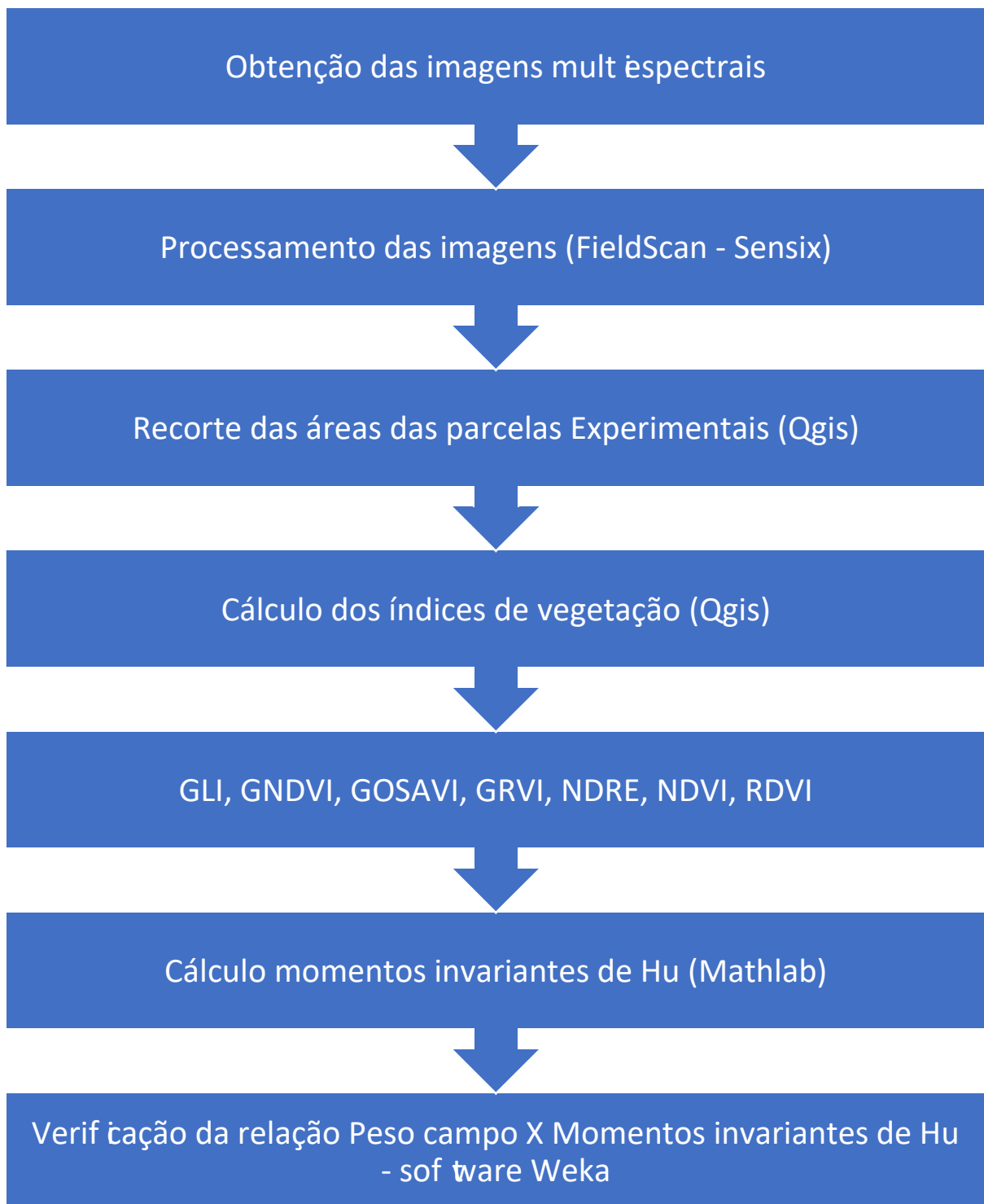
Os valores variam de -1 a 1. O intervalo comum para vegetação verde é de 0,2 a 0,8.

1.1.7 Índice de Vegetação por Diferenças Renormalizadas (RDVI)

Esse índice usa a diferença entre comprimentos de onda no infravermelho próximo e vermelho, junto com o NDVI, para destacar a vegetação saudável (ROUJEAN; BREON; 1995).

$$\text{Equação 7: } RDVI = \frac{(NIR - \textcolor{red}{i})}{\sqrt{(NIR + \textcolor{red}{i})}}$$

29 Fluxograma das operações



2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O melhor resultado foi obtido quando os dados foram padronizados para toneladas de cana por hectare (TCH), e a regressão realizada com todos os índices de vegetação dentro do mesmo aprendizado. Como foram calculados sete índices de vegetação, e para cada um deles gerado sete números (momentos invariantes de Hu), cada peso era função de outros 49 informações. Desta forma, o peso estimado é função da variação das 49 variáveis (7 índices de vegetação * 7 momentos de Hu), sendo apresentada a seguir, através da equação 8:

Equação 8:

Sendo:

D 1– D 7= GLI

D 8– D 14= GNDVI

D 15– D 21= GOSAVI

D 22– D 28= GRVI

D 29– D 35= NDRE

D 36– D 42= NDVI

D 43– D 49= RDVI

A tabela 3 apresenta algumas variáveis estatísticas obtidas pelas análises dos dados, sendo estes dados a 1251 pesos obtidos em campo e 1251 dados estimados. Destacando-se o coeficiente de correlação de Pearson (r) com valor 0,78, indicando uma correlação forte entre os dados analisados (DANCEY e REYDI, 2006).

Tabela 3. Variáveis estatísticas dos dados analisados. Experimentos conduzidos em dois anos agrícolas (2017/2018 e 2018/2019)

| | Máx | Mín | Média | Desvio Padrão | R Pearson | CV |
|------------------|-----|-----|-------|------------------|--------------|------|
| TCH campo | 200 | 20 | 83 | 32,96 | 0,78 | 0,40 |

| | | | | | | |
|---------------------|-----|----|----|-------|--|------|
| TCH estimado | 152 | 43 | 83 | 25,76 | | 0,31 |
|---------------------|-----|----|----|-------|--|------|

Observou-se que a máxima estimativa foi inferior a máxima real, e a mínima estimativa superior a real, ou seja, houve a concentração dos dados estimados, ocasionando uma amplitude inferior aos dados de campo. Estes dados podem ser confirmados analisando os histogramas da produtividade real (Figura 12) e da produtividade estimada (Figura 13).

No histograma da produtividade real, nota-se a diluição dos dados, sendo que aproximadamente 13% dos dados ficaram compreendidos na faixa de 30-50, 23% na faixa de 50-70, 24% entre 70-90, 12% entre 90-110, 12% entre 110-130, 10% entre 130-150. Com relação ao histograma da produtividade estimada, nota-se a concentração dos dados, uma vez que aproximadamente 50% dos dados ficaram compreendidos na faixa 50-70, 7% entre 70-90, 27% entre 90-110 e 8% entre 110-130.

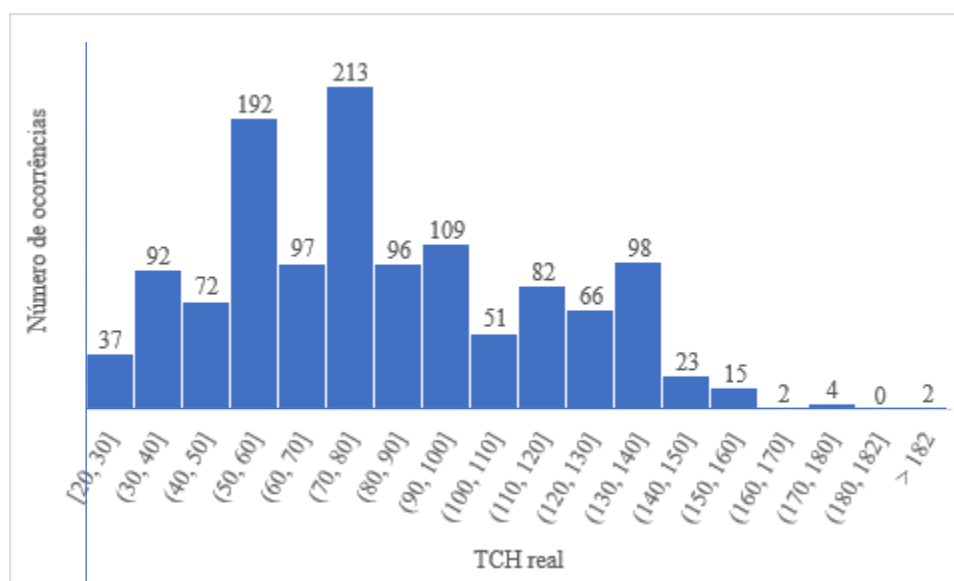


Figura 12: Histograma dos dados obtidos em campo.

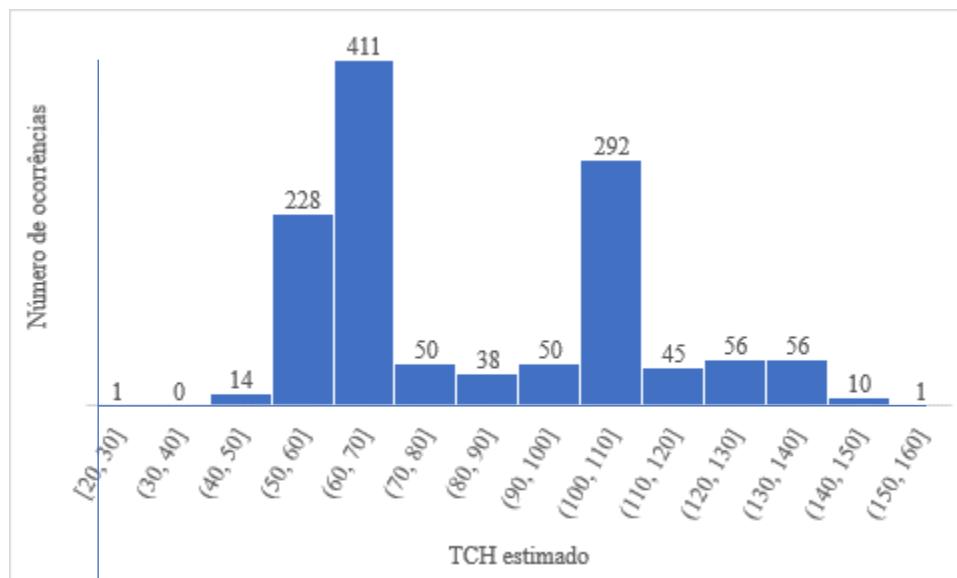


Figura 13: Histograma da distribuição dos dados estimados.

Com o intuito de mensurar a correlação entre as produtividades (real e estimada), gerou-se uma regressão, obtendo R^2 de 0,61 (Figura 14). Deve-se ressaltar que a maioria dos dados foram obtidos pela pesagem individual de cada linha da parcela, e a sensibilidade da balança foi de 10 quilos, portanto a ocorrência de determinados valores se deu de forma repetitiva.

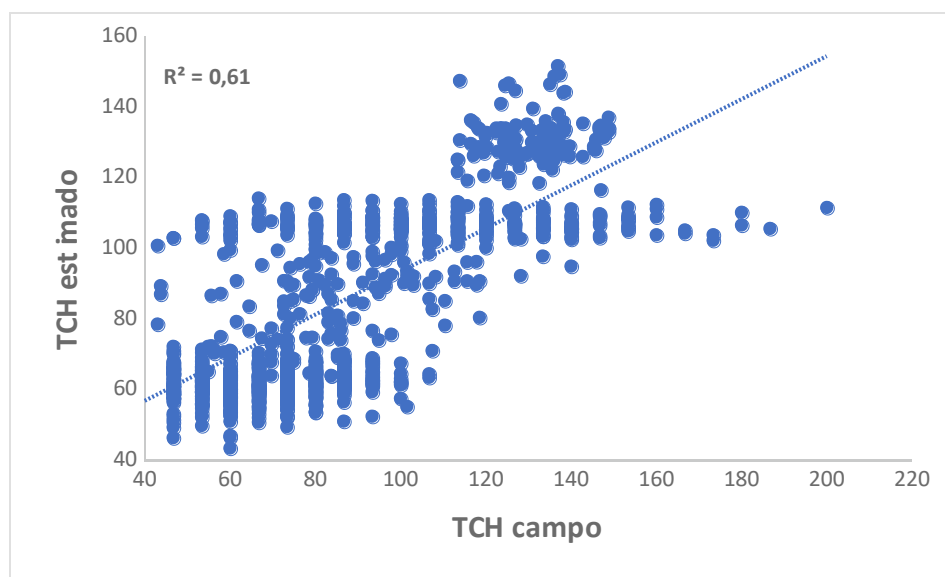


Figura 14: Regressão linear: dados campo *versus* dados estimados.

3 CONCLUSÃO

A estimativa da produtividade da cana-de-açúcar por imagens multiespectrais apresentou resultados promissores e com grande potencial de desenvolvimento. De forma que as imagens geraram um modelo para estimar a produtividade com R^2 igual a 60%, sendo os dados estimados concentrando-se na faixa de 50-70 toneladas de colmos por hectare.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, R. G.; SEDIYAMA, G.; SOARES, V. P.; GLERIANI, J. M.; MENEZES, S. J. M. C. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar utilizando o Sebal e imagens Landsat. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 29, n. e, p. 433-442, 2014.
- BARNES, E. M.; T.R. Clarke; S.E. RICHARDS; P. D. COLAIZZI; J. HABERLAND; M. KOSTRZEWSKI; WALLER, P.; CHOI, C.; RILEY, E.; THOMPSON, T.; LASCANO, R.J.; LI, H.; MORAN, M.S. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. *In*: **PROCEEDINGS OF THE 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE**, Bloomington, MN, U.S.A. 2000. Disponível em: <https://naldc.nal.usda.gov/download/4190/PDF>. Acesso em: 04 nov. 2019.
- BOCCA, F. F.; RODRIGUES, L. H. A. The effect of tuning, feature engineering, and feature selection in data mining applied to rainfed sugarcane yield modelling. **Computers and Electronics in Agriculture**, Netherlands, v. 128, p. 67–76, out. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.08.015>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169916306391>. Acesso em: 04 nov. 2019.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Brasil). **Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-Açúcar**, 2º Levantamento. Brasília, DF, 2019. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>. Acesso em: 4 nov. 2019.
- DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística sem matemática para psicologia**. 5. ed. Porto Alegre: Penso; 2013.
- DARA, A.; BAUMANN, M.; KUEMMERLE, T.; PFLUGMACHER, D.; RABE, A.; GRIFFITHS, P.; HOLZEL, N.; KAMP, J.; FREITAG, M.; HOSTERT, PATRICK.. Mapping the timing of cropland abandonment and recultivation in northern Kazakhstan using annual Landsat time series. **Remote Sensing of Environment**, v. 213, n. 2017, p. 49–60, ago. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425718302268>. Acesso em: 4 nov. 2019.
- MOREL, J.; BÉGUÉ, A.; TODOROFF, P.; MARTINÉ, J.F.; LEBOURGEOIS, V.; PETIT, M. Coupling a sugarcane crop model with the remotely sensed time series of fIPAR to optimise the yield estimation. **European Journal of Agronomy**, [s. l.] v. 61, p. 60–68, nov. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.08.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1161030114000963>. Acesso em: 4 nov. 2019.
- MULIANGA, B.; BÉGUÉ, A.; CLOUVEL, P.; TODOROFF, P. Mapping cropping practices of a sugarcane-based cropping system in kenya using remote sensing. **Remote Sensing**, [s. l.] v. 7, p. 14428-14444, out. 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs71114428>.

Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/7/11/14428>. Acesso em: 4 nov. 2019.

PICOLI, M. C. A.; CAMARA, G.; SANCHES, I.; SIMÕES, R.; CARVALHO, A.; MACIEL, A.; COUTINHO, A.; ESQUERDO, J.; ANTUNES, J.; BEGOTTI, R.A.; ARVOR, D.; ALMEIDA, C. Big earth observation time series analysis for monitoring Brazilian agriculture. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [s. l.] v. 145, p. 328-339, nov. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.08.007>.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924271618302260>. Acesso em: 4 nov. 2019.

PICOLI, M. C. A.; RUDORFF, B.F.T.; RIZZI, R.; GIAROLLA, A. Índice de vegetação do sensor MODIS na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar.

Bragantia, Campinas, v. 68, n. 3, p. 789–795, set. 2009. DOI:

<https://doi.org/10.1590/S0006-87052009000300028>. Disponível em:

[https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0006-](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0006-87052009000300028&script=sci_arttext&tlng=pt)

[87052009000300028&script=sci_arttext&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0006-87052009000300028&script=sci_arttext&tlng=pt). Acesso em: 4 nov. 2019.

RAHMAN, M. M.; J. ROBSON, A. A novel approach for sugarcane yield prediction using landsat time series imagery: a case study on bundaberg region. **Advances in Remote Sensing**, [s. l.] v. 05, n. 02, p. 93–102, jun. 2016. DOI:

<http://dx.doi.org/10.4236/ars.2016.52008>. Disponível em:

<https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=67130>. Acesso em: 4 nov. 2019.

ROBSON, A.; RAHMAN, M.M.; FALZON, G.; VERMA, N.K.; JOHANSEN, K.; ROBINSON, N.; PRAKASH LAKSHMANAN; SALTER, B.; SKOCAJ, D. Evaluating remote sensing technologies for improved yield forecasting and for the measurement of foliar nitrogen concentration in sugarcane. **International Sugar Journal**, India, v. 48, n.9, p. 27-36, 2016. Disponível em:

<https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20173179990>. Acesso em: 4 nov. 2019.

ROUJEAN, J.L.; BREON, F.M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. **Remote Sensing Of Environment**, [s. l.], v. 51, n. 3, p. 375-384, mar. 1995. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00114-3](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(94)00114-3).

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0034425794001143>. Acesso em: 4 nov. 2019.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H. ; SCHELL, J. A. ; DEERING, D. W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS Proceeding. In: **Third Earth Reserves Technology Satellite Symposium, Greenbelt: NASA SP-351**. 1974.

