

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**EMIÇÃO DE CO₂ DO SOLO E INDICADORES DE
PRODUTIVIDADE E SUAS RELAÇÕES COM
CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DA
CANA - DE - AÇÚCAR SOB DIFERENTES ÉPOCAS DE
PLANTIO**

Frederico Luiz Siansi

Engenheiro Agrônomo

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**EMIÇÃO DE CO₂ DO SOLO E INDICADORES DE
PRODUTIVIDADE E SUAS RELAÇÕES COM
CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DA
CANA - DE - AÇÚCAR SOB DIFERENTES ÉPOCAS DE
PLANTIO**

Frederico Luiz Siansi

Orientador: Prof. Dr. Newton La Scala Júnior

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

2024

S562e	Siansi, Frederico Luiz Emissão de CO2 do solo e indicadores de produtividade e suas relações com características espectrais da cana - de - açúcar sob diferentes épocas de plantio / Frederico Luiz Siansi. -- Jaboticabal, 2024 96 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal Orientador: Newton La Scala Júnior 1. Mudança climáticas 2. Agricultura 3. Tecnologia e inovação 4. Sustentabilidade 5. Performance do canavial I. Título.
-------	---

Sistema de geração automático de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

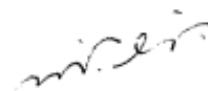
TÍTULO DA TESE: EMISSÃO DE CO₂ DO SOLO E INDICADORES DE PRODUTIVIDADE E SUAS
RELAÇÕES COM CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB
DIFERENTES ÉPOCAS DE PLANTIO

AUTOR: FREDERICO LUIZ SIANSI

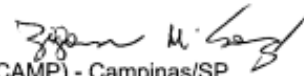
ORIENTADOR: NEWTON LA SCALA JUNIOR

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. NEWTON LA SCALA JUNIOR (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal



Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA (Participação Presencial)
Departamento de Água e Solo / Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) - Campinas/SP



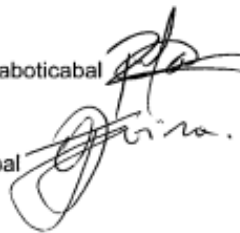
Dr. LUIS GUSTAVO TEIXEIRA (Participação Presencial)
Grupo São Martinho S/A / Pradópolis/SP



Prof. Dr. ROUVERSON PEREIRA DA SILVA (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas DECEX / FCAV UNESP Jaboticabal



Prof. Dr. GENER TADEU PEREIRA (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal



Jaboticabal, 05 de fevereiro de 2024

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

FREDERICO LUIZ SIANSI – Filho de Sebastião Luis Siansi e Magda Regina Lellis Siansi (*in memorium*), nasceu em 24 de Junho de 1987 em Ribeirão Preto – SP. Cursou graduação em Engenharia Agrônômica pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – FCAV/UNESP Jaboticabal no período entre 2010 e 2016. Foi bolsista de iniciação científica de 2011 a 2013 e de 2015 a 2016 pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e bolsista CAPES e CNPq, amparado ao programa Ciência sem Fronteiras, como aluno de graduação sanduíche nos EUA entre 2014 a 2015. Iniciou o mestrado no programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) pela FCAV/UNESP em 2017 junto ao programa Trainee da Usina São Martinho - Pradópolis. Desde a graduação vem desenvolvendo inúmeros trabalhos nos mais diversificados assuntos relacionados a Engenharia Agrônômica. No entanto, nos últimos anos concentra esforços na compreensão de como as relações entre solo e atmosfera impactam na resposta produtiva da cana-de-açúcar. Em 2020 iniciou o curso de doutorado pela FCAV/ Unesp, atuando também como Analista de Planejamento da Qualidade Agrícola da Usina São Martinho S/A, com mais ênfase em agrometeorologia, projetos agrícolas e desenvolvimento agrônômico. Diante as competências adquiridas, participou como coorientador de alguns trabalhos de conclusão de curso, e na escrita de resumos e artigos científicos. Em seu doutorado, desenvolve o projeto visando publicação em importantes revistas internacionais com assunto correlatos ao tema “Emissão de CO₂ do solo e indicadores de produtividade e suas relações com características espectrais da cana – de – açúcar sob diferentes épocas de plantio”.

Minha vó, Nair Gaffo, contou uma estória para o meu pai, e meu pai contou aos seus filhos: “Filho, preciso de linha para costurar. Vá até a loja e compre, por favor, mais linha. O filho voltou com as linhas e algumas agulhas. Isto se repetiu muitas vezes, a mãe pedia linha de costurar e o filho trazia junto não só as linhas, mas um monte de agulhas. Quando adulto, o filho foi preso, e a mãe ao visitar o filho na prisão, perguntou no que errou. O filho respondeu: Mãe, se você tivesse me reprimido na época que roubei aquelas agulhas, eu não teria me tornado um ladrão.”

(Autor desconhecido)

DEDICO

Ao meu pai, **Sebastião Luiz Siansi** e à memória da minha querida mãe, **Magda Regina Lellis Siansi**. Desde os primeiros momentos da minha existência, recordo-me da incansável batalha deles para educar os filhos, mesmo diante de consideráveis dificuldades. Meus esforços são insignificantes em comparação com o extraordinário legado que construíram para mim.

À minha família e amigos

OFEREÇO

Agradecimentos

Este trabalho não foge as demais teses, porque inclui muitas pessoas que mereciam muito destaque para serem homenageadas. Espero lembrar a maioria das pessoas que tiveram comigo para realizar este trabalho, e se por hora não as incluir, antecipo meu profundo reconhecimento e gratidão.

O que era para ser um estudo investigativo do canavial em Julho de 2019, deu origem a esta tese. Um marco significativo foi a instalação permanente da estação meteorológica da Unesp/Jaboticabal, posicionada estrategicamente nas imediações da plantação de cana-de-açúcar. Essa estação desempenha um papel fundamental ao contribuir para a compreensão dos microclimas dentro de um canavial em área comercial.

Com ajuda brilhante do técnico em agrometeorologia da faculdade, Carlos Capita, a quem devo meu muito obrigado por estes anos, conseguimos colocar uma estação recheada de sensores e com envio dos dados de forma automática. Júlio Acaboci, André Toscana, Romílson Yamamura, Marquinhos, Prof Glauco, Guilherme Buonadio, Lucas Lopes, Wellington, Jeferson Silva, Rodrigo, vocês foram fundamentais para deixar a estação em campo, por me ajudar nas medições, e me abastecer de novas ideias que anos mais tarde seria assunto da tese. Muito obrigado pelo apoio e amizade de vocês.

Estes anos iniciais de aprendizagem, que antecedem o período do plantio da tese, foram muito importantes, e já daquela época contava com apoio da equipe da São Martinho para conduzir com as medições biométricas em campo. Por isto, em nome do atual diretor agrícola e de tecnologia Luís Gustavo Teixeira, do diretor Ricardo, do gerente Diego Furlan, e do gestor Josué, eu antecipo meus agradecimentos e gratidão.

Aproveito para lembrar do Rafael Peluco, Lucas Cortez, Ana Beatriz, Prof Júnior, Diego Siqueira, que, por muitas vezes neste anos, puderem me ouvir e ajudar a clarear minhas ideias.

Com a estação em campo comercial, iniciei o doutorado em Março de 2020 com o aceite do Prof. Newton, meu orientador de doutorado. Encontrei no Prof. Newton um confiança jamais vista antes, que muito me apoiou, me ajudou, me incentivou. Não estaria até aqui se não fosse o Prof. Newton. Obrigado por tudo Prof.

Com a ajuda e apoio do Programa de Ciências do Solo da Unesp/ Jaboticabal, encontrei uma faculdade a me ajudar, e foi nas aulas de doutorado e nas trocas de experiências com aluno e professores, que com certeza, me fizeram melhor que eu era antes.

Agradeço, assim, a coordenadora do programa de Ciências do solo e amiga Prof^a. Teresa Pissarra, e ao Prof. Alan Panosso, por uma brilhante ajuda nas avaliações estatísticas com uso do R Studio. Neste sentido de aprendizado, é importante minha aproximação com o processo de modelagem usando o Python junto ao Prof. Luiz Henrique (Prof. Lique) da Unicamp, sem contar, com apoio e referência do Prof. Glauco em tantas idas e vindas para me ajudar nas avaliações. Novamente, meu muito obrigado.

Fato é, que quando a estação veio para a área do experimento, na região de Barrinha, em Agosto de 2020, tínhamos a certeza que colocar mais variedades como tratamentos seria o indicado. Entretanto, 6 meses depois veio a pandemia do Covid, mas, na contramão do que poderia imaginar, posto que a ocasião pedia, os próximos passos do estudo, na verdade, foram se fortalecendo.

Em Agosto de 2021 as primeiras amostragens do solo foram realizadas nas áreas do experimento pensando em reforma do canavial. Aqui vale lembrar do apoio do laboratório de Química Agrícola da Usina São Martinho, na imagem da Antônio Pachir, Ronaldo, Lucas, Marcelo Domingos. Muito obrigado em permitir contar com o apoio de vocês nas análises de solo deste experimento.

Da época das primeiras leituras, os alunos Marcelo e Paulo, junto com o Prof. Rouverson deram total apoio e investidas nos voos com o drone recém-chegado a Unesp/ Jaboticabal. Não era esperado tamanho apoio, porque era muito grandioso vir todo mês realizar os voos, fora ter sensores com banda multiespectral, o que era imaginável e aconteceu. Eu agradeço imensamente o apoio e a confiança de vocês.

Assim como, não era esperado o apoio do Prof. Pedro, que muito generosamente emprestava os sensores de clorofilômetro e índice de área foliar mensalmente para as leituras. Obrigado pelas conversas e amizade Prof. Pedro. Assim como, muito obrigado aos meus amigos de leitura do sensor de CO₂ e O₂, que aceitaram o desafio, acordando de madrugada para chegar ainda no pôr do sol e iniciar as leituras de emissão de gases.

Para vocês que vieram a campo, aqueles cafés que fazíamos no nosso canto de descanso, carinhosamente apelidado de “bate caverna”, era muito gratificante. Obrigado Kleve, Wanderson, Arianis, Felipe, Joseph, Juan, Otávio, Daniel, Marcelo Odorizza, Luiz Miguel, Fernando Rossi, Reinaldo, Victor Antônio e Valter. Não teria conseguido ter um apoio técnico em campo tão grande se vocês não tivessem me apoiado, e com posterior ajuda nas avaliações dos dados.

Durante as primeiras leituras biométricas, já enxergava que em pouco tempo iríamos precisar de mais tempo ou mais pessoas. Uma destas pessoas, o aluno Eduardo Arruda, conseguiu acompanhar desde a preparação do solo até as últimas leituras em campo. Tornou parceiro, amigo, e deixo meu profundo agradecimento e desejo que ele receba em dobro do que fez aqui neste trabalho.

Parte das medições em campo, sempre contei com a equipe de profissionais e amigos da Experimentação Agrícola. Estevão, Gustavo, Chacrinha, Cosme, Dino, Wesley, BigZu, Chinelo, Paulo, Almir, Nelson, Lucas Parra, Leonel, Mariana, Eduarda, Gabriela, Guilherme, e tantos mais. O meu aprendizado deve muito a vocês. Obrigado não apenas por estarem comigo, mas apoiar quando precisei. Como um time, vamos sempre melhorando, e sei que vocês podem contar comigo e eu com vocês.

Das conversas de apelo técnico, eu também agradeço a equipe do CTC, IAC, Tempocampo e Agrymet, em nome, respectivamente, do Celso, Dr Maximiliano, Prof. Fábio e finado Prof. Sentelhas. Assim como, das minhas conversas sobre planejamento com a Lidiane e João Carlos, e desde meu parceiro antigo de guerra, que muito me ajudou nos estudos agroclimáticos, Edson Lavezzo, o Peta, eu deixo meu profundo agradecimento.

Pela atenção e carinho que recebia, eu agradeço a secretária do departamento de Ciências Exatas Adriana e da Wanessa da estação agroclimatológica da Unesp, além da aproximação que tive com o chefe do departamento, Prof Danísio, deixo meus agradecimentos.

Pelo tempo de escrita, muita contribuição veio das conversas com os Prof. Paulo Figueiredo da Unesp/Dracena, Prof. Rafael Otto da Usp/Esalq e Prof. Crusciol da Unesp/Botucatu, que compartilhando algumas ideias, puderam me direcionar para escrever a luz do conhecimento, principalmente as partes da discussão de resultados do capítulo 3 da tese. Na parte escrita, pude contar com a leitura minuciosa do

gramático Prof. Vitório Barato Neto, que não deixando faltar nenhuma vírgula e desrespeito às normas da língua da portuguesa, contribuiu em muito para melhorar o trabalho. Muito obrigado por isto Prof. Vitório.

Meus agradecimentos também vão para a banca da qualificação desta tesa: Prof. Dr. Glauco de Souza Rolim , e Dr. Rafael Gonçalves Peluco, e aos profissionais que me avaliaram na defesa: Prof. Dr. Gener Tadeu Pereira, Prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva, Prof. Dr Zigomar Menezes de Souza e Dr. Luís Gustavo Teixeira.

Foi na minha namorada Monalisa a grande diferença para me apoiar quando eu estava nos preparativos a idas a campo, ou quando estudando, muito compreensiva, pode me incentivar a estudar mais. Obrigado pelo imenso carinho. Também agradeço em nome das minhas tias tão queridas, onde muitas vezes apenas pelo simples prazer de estar junto com elas eu me sentia renovado. Obrigado família Ferri, Primo, Lellis, Chaguri, aos meus tios, primos e primas, e as muitas conversas e risadas com a Sueli, que de muitos cafezinhos, me abastecia para voltar a me concentrar e seguir em frente.

Meu muito obrigado aos meus amigos de longa data, inseparáveis, do grupo samba D1 e da turma do bar do márcio (Willy, Jay, Leo, Mascote, Camarão, Japa, Túlio, Cainha, Tiago, Felipe, Dimas, Gustavo, Lima) e do pepino 6 (Chicó e Liedson). Conto com a gratidão de estar perto de vocês, e isto me fortalece. Obrigado. Agradeço também a amizade e carinho de muitos anos, do nosso pároco do bairro, que pelo apoio espiritual me faz caminhar seguro e com fé, obrigado Padre Egg.

Mas, muito obrigado mesmo a minha família, ao meu pai Luis, a meus irmãos Felipe e Fabrício. Tenho certeza de que nossa mãe Magda, que lá no céu está, tem muito orgulho de nós. O que sou da minha vida é por vocês, aprendendo a amar, a respeitar, a buscar mais a se entregar ao outro do que em receber em troca. Tenho muitos motivos para acreditar que, meus irmãos e eu, somos fruto de um amor que a morte não separou. Sou feliz em ter saúde e tantas pessoas boas ao meu lado. Isto é meu tesouro, é disto que eu preciso, e sou imensamente grato a Deus pela dom da vida.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	XIV
ABSTRACT.....	XV
CAPÍTULO 1- CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.1 Introdução	1
1.2 Revisão de Literatura	3
1.2.1 O legado da cana-de-açúcar para o mundo e para o Brasil.....	3
1.2.2 Produção de cana-de-açúcar: Análise das condições edafoclimáticas e seus Impactos.....	6
1.2.3 Diferentes materiais genéticos e implementação de estratégias visando canaviais mais produtivos	9
1.2.4 Épocas de Plantio de cana-de-açúcar: Estratégias e Desafios.....	11
1.2.5 Relações entre Emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) e sistema canavieiro.....	14
1.2.6 Indicadores espectrais na agricultura	18
1.3 Referências.....	22
CAPÍTULO 2- EMISSÃO DE CO₂ E SUA RELAÇÃO COM ASPECTOS DO SOLO-PLANTA-ATMOSFERA EM ÁREAS DE PLANTIO DE CANA-DE-AÇÚCAR	28
ABSTRACT.....	29
2.1 Introdução	30
2.2 Material e Métodos.....	31
2.2.1 Área de estudo	31
2.2.2 Avaliações biométricas em campo	34
2.2.3 Avaliação de imagem e análise espectral.....	35
2.2.4 Determinação dos fluxos de gases, temperatura e umidade do solo	35
2.2.5 Avaliação e validação dos modelos.....	37
2.3 Resultados e Discussão.....	38
2.4 Conclusões	47
2.5 Agradecimentos	48
2.6 Referências.....	48
CAPÍTULO 3- RELAÇÕES ENTRE INDICADORES DE PRODUTIVIDADE E ESPECTRAIS EM ÁREAS DE PLANTIO DE CANA-DE-AÇÚCAR	51
ABSTRACT.....	52
3.1 Introdução	53
3.2 Material e Métodos.....	54
3.2.1 Área de estudo	54
3.2.2 Área experimental	55
3.2.3 Avaliações aferidas em campo.....	57
3.2.4 Análise dos dados.....	59
3.3 Resultados e Discussão.....	61
3.4 Conclusões	76
3.5 Agradecimentos	76
3.6 Referências.....	77
CAPÍTULO 4- CONSIDERAÇÕES FINAIS	80

Emissão de CO₂ do solo e indicadores de produtividade e suas relações com características espectrais da cana - de- açúcar sob diferentes épocas de plantio

RESUMO – Muitos fatores podem impactar as emissões de CO₂ à atmosfera, que é um dos principais gases que favorecem o aquecimento global terrestre. Estes fatores na Agricultura estão muito relacionados ao solo, ao clima e a planta. Neste sentido, este trabalho buscou acompanhar, desde o plantio a colheita, sete variedades de cana-de-açúcar sob duas épocas de plantio. O trabalho foi realizado em três capítulos, sendo o primeiro mostrando uma abordagem geral da importância do estudo. No segundo capítulo, avaliou-se a emissão de CO₂ do solo e sua relação com atributos do solo (temperatura e umidade do solo), da planta (diâmetro, altura, número de perfilhos, índices de clorofila e de área foliar) e bandas espectrais (R,G,B, RedEdge e NIR) e índice NDVI. E no terceiro capítulo avaliou-se as relações entre indicadores de produtividades e indicadores espectrais. Os capítulos dos estudos aconteceram em fazenda experimental no município de Barrinha, estado de São Paulo, sob delineamento em blocos casualizados. As épocas de plantio foram as de 18 meses e de dois verões. As variedades mais recentes mostraram ser as que possuem comportamento de menor emissão de CO₂ do solo quando comparadas as variedades mais antigas. Os maiores picos das emissões mensais de CO₂ do solo (6,56 e 4,97 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) aconteceram na estação chuvosa, em ambas as épocas de plantio. Além da temperatura e umidade do solo, destaca-se o NDVI (Índice de vegetação por diferença normalizada) como importante fator ($p < 0,05$) a se compreender o fluxo de CO₂ do solo. Entre os modelos de aprendizado supervisionados de máquinas, que foram testados, o melhor desempenho foi para o Random Forest, com R^2 variando entre 0,77 e 0,84. No capítulo 3, o indicador de produtividade para a cana de dois verões foi 13,45% a mais em TCH (toneladas de cana por hectare) em relação ao plantio de 18 meses, não observando diferenças significativas para perdas da qualidade da matéria prima. As melhores correlações entre NDVI e produtividade aconteceram de forma mais distribuída para a cana de dois verões, com valores de correlação variando entre -0,48 a 0,32 ($p < 0,05$), e de forma mais concentrada nos dias que antecedem a colheita para a cana de 18 meses, com correlações variando entre -0,68 a 0,68 ($p < 0,05$). A banda do vermelho, seguido pelo NIR e Green, foram as que tiveram melhor desempenho em capturar as flutuações dos indicadores de TCH, ATR (Açúcar total redutor) e TAH (tonelada de açúcar por hectare) quando sob modeladas por equações polinomiais variando a ordem de grandeza. Portanto, tanto as emissões de CO₂ e os indicadores de produtividade estão correlacionados com as variáveis biofísicas e ambientais, e conseguir esta compreensão pode contribuir na orientação de ações governamentais de mitigação de CO₂ a atmosfera e ajudar o produtor a acompanhar a produtividade de forma indireta por meio de análise espectral.

Palavras-chave: mudanças climáticas, agricultura, tecnologia e inovação, sustentabilidade, performance do canavial

CARBON DIOXIDE DYNAMICS AND SPECTRAL RESPONSES OF SUGARCANE UNDER DIFFERENT PLANTING SEASONS

ABSTRACT – Many factors can impact the emissions of CO₂ into the atmosphere, one of the main gases contributing to global warming. In agriculture, these factors are closely related to soil, climate, and plants. In this context, this study will monitor seven varieties of sugarcane from planting to harvest, considering two planting seasons. The research is divided into three chapters. The first provides a general overview of the study's importance. In the second chapter, the emission of CO₂ from the soil was evaluated, along with its relationship with soil attributes (temperature and soil moisture), plant attributes (diameter, height, number of tillers, chlorophyll, and leaf area indices), and spectral bands (R, G, B, RedEdge, and NIR) and the NDVI index. In the third chapter, the relationships between productivity indicators and spectral indicators were evaluated. The studies took place at an experimental farm in the municipality of Barrinha, state of São Paulo, following a randomized block design. Planting seasons included 18 months and two summers. The newer varieties showed lower soil CO₂ emissions compared to older varieties. The highest peaks of monthly soil CO₂ emissions (6.56 and 4.97 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) occurred during the rainy season in both planting seasons. In addition to soil temperature and moisture, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) stood out as an important factor ($p < 0.05$) in understanding soil CO₂ flux. Among the tested supervised machine learning models, Random Forest performed the best with R^2 ranging from 0.77 to 0.84. In Chapter 3, productivity indicators for sugarcane from two summers were 13.45% higher in TCH (tons of cane per hectare) compared to the 18-month planting, with no significant differences observed in raw material quality losses. The best correlations between NDVI and productivity occurred more evenly for sugarcane planted in two summers, with correlation values ranging from -0.48 to 0.32 ($p < 0.05$), and more concentrated in the days leading up to harvest for the 18-month sugarcane, with correlations ranging from -0.68 to 0.68 ($p < 0.05$). The red band, followed by NIR and Green, performed best in capturing fluctuations in TCH (Total Cane Harvested), ATR (Total Reducing Sugars), and TAH (tons of sugar per hectare) indicators when modeled by polynomial equations varying in magnitude. Therefore, both CO₂ emissions and productivity indicators are correlated with biophysical and environmental variables, and understanding this relationship can contribute to guiding governmental actions to mitigate CO₂ emissions and help producers indirectly monitor productivity through spectral analysis.

Keywords: climate change, agriculture, technology and innovation, sustainability, sugarcane field performance

CAPÍTULO 1 - Considerações gerais

1.1 Introdução

Ao longo da história, a agricultura vem desempenhando papel primordial na humanidade. Depois que a vida nômade passou a transitar de caça de animais e coletas de alimentos para uma sociedade agrícola na Revolução Neolítica em diversas partes do mundo, entre 10.000 a 2.000 a.C., a domesticação de plantas e animais se tornou uma realidade. Essa transição teve impacto crucial de como as comunidades começaram a organizar suas vidas e sociedades.

A agricultura foi gradualmente melhorando devido a diversos fatores, que incluem práticas agrícolas, avanços tecnológicos e técnicas de processamento. Isto a fez passar não apenas a fornecer alimentos, mas também a fibras, a combustíveis, a matéria-prima, a medicamentos, a bebidas, a adubos orgânicos etc.

Nesse cenário de versatilidade da agricultura é que se destaca a cana-de-açúcar. Isto porque este cultivo desempenha um papel multifacetado, contribuindo para diversos setores, com mais destaque para o setor alimentício com o açúcar e para o setor da indústria de energia com o etanol.

Neste papel significativo da cana-de-açúcar nas matrizes agrícolas e econômicas do Brasil, tornou-se essencial compreender as nuances relacionadas ao rendimento desta cultura frente as diversidades climáticas, sobretudo do impacto ambiental frente as emissões de carbono à atmosfera. Assim como, se tornou primordial abordar conceitos inovadores para seu monitoramento como, por exemplo, uso de indicadores espectrais.

Relatórios científicos respaldam as informações de especialistas ao apresentar evidências de que as condições atmosféricas para o desenvolvimento de culturas hoje diferem significativamente daquelas do período pré-industrial (1850 – 1900). No último relatório do IPCC (Painel Intergovernamental para a Mudança de Clima) em 2023, por exemplo, vários registros apontam as crescentes ondas de calor, isto devido a diversos fatores que incluem as atividade humanas.

Assim como, no último compilado de dados da última normal climatológica (entre 1991 e 2020) no Brasil, fornecido pelo Inmet (Instituto Nacional de Meteorologia), registros mostram que os déficit hídricos aumentaram nas regiões

produtores de cana-de-açúcar. As evidências se tornam mais nítidas que os ambientes de produção dos canaviais enfrentarão desafios em termos de produtividade e adaptação da planta ao ambiente.

Como fonte de energia limpa, com destaque de produção que prioriza a baixa emissão de carbono, a atenção aos canaviais vem ganhando atenção a corrida mundial por créditos de carbono e práticas agrícolas que valorizam as menores agressões ao ambiente. Neste sentido, a escolha varietal nos canaviais podem ser um sumidouro de carbono, além de desempenhar papel na produtividade frente as resistências ambientais tais como chuva escassas, ou intensas em pouco tempo, e picos de temperaturas mais frequentes.

Como meio de diversificação desta cultura, olhar só a quantidade em termos de quantidade de cana em toneladas por hectare (TCH) não é mais sinal de competitividade no mercado. A qualidade da matéria prima do canavial, podendo ser indicada pelo Açúcar Total Recuperável (ATR), e da relação entre quantidade e qualidade expressa por Toneladas de Açúcar por hectare (TAH), devem também ser consideradas para avaliar a performance do canavial.

Inclui neste cenário de produção os diferentes planejamentos de épocas de plantio, que podem ser, por exemplo, as épocas de plantio de dois verões, e as de 18 meses. Como a cana-de-açúcar tem estádios de desenvolvimento específicos e diferentes entre si, ao plantar em diferentes épocas pode-se esperar também diferentes respostas produtivas do canavial.

Os avanços de materiais genéticos na cana-de-açúcar contribuíram significativamente para seu desenvolvimento em diferentes classes de solo e condições climáticas. E os principais reservatórios de carbono do mundo estão nos solos, perdendo apenas para os oceanos. Entender o solo como um sistema dinâmico é fundamental para a agricultura e ecologia, pois influencia diretamente a saúde das plantas e a disponibilidade de nutrientes. A interação entre diferentes materiais genéticos de cana, atividades microbianas e condições climáticas influenciam as taxas de emissão de CO₂ do solo (FCO₂), contribuindo para o entendimento abrangente do ciclo do carbono (Lal et al., 2015).

Enquanto a preservação e conservação da vegetação são necessárias para a reciclagem de CO₂, há uma necessidade de produção de alimentos em larga escala,

em relação ao aumento da população mundial. Mas estes desafios de produção ficam à deriva quando se observa aumento de áreas devastadas por incêndios por causas naturais ou criminosas, e quando tem pouca ou nenhuma acessibilidade as práticas agrícolas aos pequenos produtores.

Uma das formas de melhorar a produção com as áreas já disponíveis é fornecendo tecnologias. E para acelerar este processo, o uso de sensoriamento remoto in situ é uma ferramenta, sobretudo com o uso de drones acoplados a câmeras com sensores capazes de realizar leituras de parâmetros fenológicos e biofísicos da planta (Huete et al., 2002).

Neste sentido, a hipótese deste estudo é que as épocas de plantio, ao disponibilizar de maneira distinta condições hídricas e térmicas à planta, irão não apenas influenciar no desenvolvimento da cana, como também influenciar nas emissões de CO₂ do solo (FCO₂). Esta interferência irá impactar na tentativa de modelar os fluxos de CO₂ do solo. E que, as bandas espectrais extraídas de sensores multiespectral, estarão relacionadas aos indicadores de emissão de CO₂, como o NDVI (índice de vegetação por diferença normalizada), e às variáveis de produtividade (TCH, ATR e TAH).

Assim, o objetivo do estudo é avaliar as características biométricas, relacionados às variáveis que interferem no fluxo de CO₂ e compreender como os indicadores espectrais conseguem capturar as respostas produtivas de duas épocas de plantio com sete variedades de cana-de-açúcar.

1.2 Revisão de literatura

1.2.1 O Legado da Cana-de-açúcar para o mundo e para o Brasil

A cana-de-açúcar tem suas raízes na Ásia Meridional, mais especificamente na região central da Nova Guiné e leste da Indonésia, datando de aproximadamente seis mil anos antes de Cristo. Na antiguidade, acredita-se que a cana-de-açúcar era tratada como um tempero ou remédio, sendo adoçada com mel de abelhas (Fauconnier e Bassereau, 1975). No entanto, essa percepção de "mel da cana" já era conhecida pelos chineses muitos milênios antes de Jesus Cristo.

Da Ásia Meridional, a cana-de-açúcar se disseminou para o restante da Ásia, África e, posteriormente, para a Europa, supostamente graças ao almirante de

Alexandre, "O Grande", chamado Néarque (Santos et al, 2023). A jornada da Europa para os povos do ocidente aconteceu próximo aos 325 anos antes de Cristo. E os primeiros a reconhecerem o potencial da cana-de-açúcar como matéria-prima foram os árabes da Espanha, na região da Andaluzia, cultivando-a desde o ano de 755 d.C.

Em 1493, no período das grandes navegações, Cristóvão Colombo introduz a cana-de-açúcar nas Antilhas, continente americano. O primórdio da cana-de-açúcar no Brasil, entretanto, é datado somente em 1532 no litoral paulista, município de São Vicente (SP), quando o português Martin Afonso de Souza introduz o cultivo desta cultura. A expansão continuou, com posterior plantios chegando aos estados de Pernambuco e Bahia, solidificando a presença e importância da cana-de-açúcar no território nacional (Castro e Kluge, 2001).

Foi no século XVII que a cultura ganhou notória evidência quando chegou no Planalto Ocidental Paulista, região de Itu com destaque na época como o maior centro açucareiro do Estado de São Paulo até meados do século XIX (Mozambini et al., 2006). Mas, com o crescimento da economia do café e ampla concorrência do açúcar no mercado externo, a cana perdeu importância no cenário econômico no final do século XIX e início do século XX.

O retorno da importância da cana aconteceu ainda no início do século XX, na década de 20, quando o Brasil começou a utilizar o álcool, derivado da cana, como combustível em automóveis. A criação do Proálcool, devido à crise do Petróleo em meados da década de 70, ajudou também a fortalecer o incentivo do governo à produção de álcool como combustível. O aumento do cultivo continuou a proceder, também, durante os anos 90 quando o álcool etílico anidro passou a ser adicionado à gasolina.

Desde as décadas de 90 até os dias atuais, expressivos avanços nos canaviais aconteceram, marcados, por exemplo, por notáveis progressos nos maquinários agrícolas de colheita, agricultura de precisão, digital e plataformas de gestão, uso de drones, bioinsumos, nanotecnologias, fungos entomopatogênicos, manejo integral de pragas, conectividade em campo, ferramentas estatísticas, incorporação de inteligência artificial, entre outros inovadores desenvolvimentos.

Destaca-se, sobretudo, uma resposta ágil na gestão de recursos humanos, evidenciada pelo esforço contínuo das pessoas em busca de qualificação. Este

dinamismo reflete a adaptação rápida aos desafios apresentados, permitindo que profissionais se envolvam nos diversos ramos que o sistema canavieiro oferece.

Essas transformações não apenas impulsionam a eficiência na produção, mas também fomentam uma abordagem mais sustentável e tecnologicamente avançada na agricultura, consolidando a posição do setor como líder em inovação e desenvolvimento.

Desta forma, é expressiva os pilares socioeconômicos da cadeia açúcar/álcool provenientes da cana-de-açúcar. Na última safra 2022/23, por exemplo, o Brasil foi o principal produtor e exportador de açúcar do mundo, contribuindo com cerca de 22% da produção e aproximadamente 43% do comércio internacional desse produto (Vidal, 2023). O principal mercado para o etanol brasileiro continua sendo o interno, e o Brasil é o segundo maior produtor global de etanol (Soares e Júnior, 2021).

Com base no 3º Levantamento da Safra 2023/24 apresentado pela Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), projeta-se um crescimento de 10,9% na produção em comparação ao ciclo anterior. A expectativa é que a colheita atinja a marca de 677,6 milhões de toneladas, o que seria um novo recorde na série histórica da estatal.

Essa previsão otimista ressalta o potencial de expansão e desempenho robusto da safra, indicando uma contribuição significativa para a oferta de alimentos e a estabilidade no abastecimento. Se superar os recordes anteriores irá sublinhar a eficiência e resiliência do setor agrícola, refletindo o resultado do trabalho árduo dos produtores e as condições favoráveis ao desenvolvimento das culturas.

Para o estado do presente estudo, estado de São Paulo, outras considerações merecem destaques. São Paulo mantém sua posição como o principal produtor de cana do país, com projeções indicando um crescimento de 4,9% na produção para a atual safra. Essa melhoria é atribuída às otimizações nas lavouras e às condições climáticas favoráveis que propiciaram melhor um desenvolvimento da cultura. Este ganho é esperado mesmo com a diminuição de áreas produtivas (Conab, 2023).

Ainda em destaque pelas últimas atualizações da Conab, as produtividades de açúcar e etanol apontam considerados aumentos para esta safra 23/24. Enquanto países concorrentes, como Índia e Paquistão, enfrentaram desafios decorrentes de condições climáticas adversas, o Brasil encontra-se em uma posição vantajosa devido

à sua capacidade de oferecer açúcar em um cenário em que outros terão uma oferta mais restrita. Essa situação coloca o Brasil em uma posição estratégica, possibilitando aproveitar os benefícios decorrentes da escassez de oferta experimentada por outros países.

Os atuais conflitos entre Ucrânia e Rússia e Hamas e Israel não tiveram, até o momento, impactos nos principais produtores de petróleo, conforme reportado pela FOLHA DE SÃO PAULO em novembro de 2023. Pelo contrário, em períodos de incerteza, muitos governos adotam medidas de estímulo econômico para mitigar os efeitos negativos de uma recessão. Notavelmente, os Estados Unidos da América, um dos principais produtores de petróleo, têm aumentado sua produção, contribuindo para a redução nos preços do petróleo.

Essa dinâmica pode resultar em oscilações nos preços dos combustíveis no mercado de etanol no Brasil. Apesar das melhorias na produção e produtividade registradas no estado de São Paulo, essa variabilidade econômica apresenta desafios adicionais para o setor canavieiro.

1.2.2 Produção de Cana-de-Açúcar: Análise das Condições Edafoclimáticas e Seus Impactos

A cana-de-açúcar pode ser classificada , segundo Cronquist (1988), como pertencente ao Reino - Vegetal; Divisão – Magnoliophyta; Classe – Liliopsida; Subclasse – Commelinidae; Ordem – Cyperales; Família – Poaceae; Tribo – Andropogonae; Subtribo – Saccharininae; Gênero – *Saccharum*; Espécie - *Saccharum officinarum* L., *Saccharum robustum* J., *Saccharum sinnensis* R., *Saccharum barberi* J., *Saccharum spontaneum* e *Saccharum edule*.

Sabe-se que desde o início dos tempos, as principais espécies cultivadas foram a *Saccharum officinarum* L., e, provavelmente, apenas uma cultivar foi plantada entre os anos de 1532 e 1810 durante a colonização, a cana chamada “Creoula” ou “Mirim” ou “Cana da terra” (Machado e Habib, 2021). A cana “Creoula” por ser rústica e muito suscetível a doenças, começou a ser substituída pela cultivar Caiana a partir de 1810, que era uma cultura mais produtiva e rica em sacarose do que em relação a cana “Creoula”. Mas, próximo ao ano de 1880, a cultivar Caiana foi submetida a um

severo ataque de gomose, uma bactéria que atingiu a maioria dos canaviais da época (Santos et al., 2023).

No início do século XX aumentaram os híbridos de cana para justamente proporcionar variedades mais resilientes às doenças e condições climáticas adversas, com seleção de vários ensaios provenientes, principalmente, da hibridação natural entre *Saccharum officinarum* e *Saccharum barberi* (Landell et al., 2006).

Embora a construção de destaque ser nacional e nível internacional na produção de energia e alimentos, a cana-de-açúcar tem características bem específicas durante os estádios fenológicos. As principais etapas da cana, independentes das classes de solos e/ou épocas de plantio são brotação e emergência, estabelecimento e perfilhamento, crescimento intenso e maturação (Doorembos e Kassan, 1979; Gasho e Shih, 1983).

Nestes últimos 10 anos, pelo menos, muito intensificou no estado de São Paulo e no Brasil o plantio com mudas pré-brotadas, que ajudam a melhorar a eficiência, reduzir o tempo de formação do canavial e aumentar a produtividade. Na fase de brotação, em biofábricas de produção de mudas, algumas etapas fundamentais são necessárias, e o monitoramento das temperaturas e umidades relativas do ar são essenciais para ajudar no desenvolvimento das gemas, advindas de mini rebolos pré - tratados, a se desenvolverem em mudas de cana-de-açúcar.

Quando estas mudas saudáveis chegam em campo, o processo fisiológico segue seu fluxo em sintonia com as condições edafoclimáticas do local. A preocupação inicial é o pegamento destas mudas, que pode vir com a aplicação de água via aspersor ou vinhaça, ou pela precipitação. No presente trabalho, nas duas épocas de plantio, as mudas receberam no mesmo dia que foram plantadas 20 mm de água por aspersão utilizando uma moto bomba adaptada, e, coincidentemente, mais 20 mm no dia seguinte após o plantio de água da chuva.

À medida que as mudas se aprofundam no solo para absorver água e nutrientes por meio das raízes, aumentando a emissão de folhas e o número de perfilhos, garantem sua sobrevivência com reservas próprias. Nessa fase de crescimento, diversos processos, como divisão, diferenciação e alongamento celular, ocorrem.

Magalhães (1987) destaca que, entre os fatores ambientais, a temperatura é provavelmente o que mais impacta o desempenho da cana-de-açúcar. A taxa de

crescimento ótimo da cana situa-se entre 22 e 30°C, sendo notadamente lenta abaixo de 20°C e acima de 38°C (Van Dillewijn 1952; Fauconier e Bassereau 1975; Barbieri et al., 1979). Portanto, as épocas mais propícias para o crescimento do canavial nas regiões tropicais são de outubro a abril, período em que há estímulo ambiental para a formação do canavial (Castro, 1999).

Vale ressaltar que a temperatura noturna exerce influência mais significativa no desenvolvimento do canavial do que as temperaturas diurnas, desempenhando, também, papel crucial na maturação e no florescimento. Durante a maturação, as noites frias, conforme destacado por Magalhães (1987) e Doorenbos e Kassam (1994), contribuem para maior concentração de sacarose nos colmos.

Adicionalmente, temperaturas noturnas superiores a 18°C entre 25 de fevereiro e 20 de março de 2023, quando o fotoperíodo variou entre 12 e 12,5 horas, associadas a temperaturas diurnas abaixo de 31°C, e em condições ideais de armazenamento de água no solo, umidade, radiação solar e fertilidade do solo, propiciaram a indução ao florescimento na área do estudo (Araldi et al., 2010).

Dado que o objetivo deste estudo era avaliar os impactos das condições climáticas, optou-se por não aplicar inibidores, resultando no florescimento de todas as parcelas das variedades RB855156. Pesquisas anteriores indicam que o florescimento pode aumentar os teores de fibras sem interferir no pol da cana, mas pode reduzir a qualidade da matéria-prima (Bacchi, 1983; Silva neto et al., 2011). Além disso, o florescimento é frequentemente associado à isoporização dos colmos (Gosnell e Julien, 1976). Contudo, no presente estudo, não foram identificados sinais de chochamento após levantamento prévio dos colmos antes da colheita.

A maturação é considerada, assim, a última fase fenológica da cana. Embora não seja uma fase fisiologicamente bem definida (Marin, 2003), envolve o acúmulo de sacarose principalmente nos entrenós basais. Apesar de o ciclo da cana exigir entre 1500 e 2500 mm de água, de forma mais uniforme, é desejável que, durante a maturação, haja poucas precipitações e temperaturas entre 10 e 20°C (Doorenbos e Kassam, 1994; Ometto, 1980). Manter o estresse hídrico nesta fase é interessante para frear o crescimento vegetativo e forçar a cana a produzir mais açúcar, armazenando-o nos tecidos das plantas.

Nesta fase final do ciclo, o mecanismo fotossintético continua, mas a elongação da cana é restrita, especialmente em períodos com déficit hídrico e frio moderado. Na região Sudeste do Brasil, por exemplo, o ápice da maturação dos canaviais ocorre em outubro, coincidindo com a transição do período seco e frio para o chuvoso e quente. Neste trabalho, não foram utilizados fatores exógenos para promover a maturação, mas é relevante destacar muitas aplicações de maturadores no setor canavieiro visando aprimorar o rendimento dos canaviais.

1.2.3 Diferentes materiais genéticos e implementação de estratégias visando canaviais mais produtivos

É inegável que altos investimentos em manejo varietal são justificados pelo retorno produtivo, uma vez que a adoção de novas variedades proporciona maior resiliência a condições ambientais adversas. Conforme destacado nos estudos de Oliveira (2021), mesmo em ambientes desfavorável a rentabilidade inicial foi de 10% com a adoção de novas variedades. Além disso, Perecin et al. (2009) demonstraram um aumento de 1,28% na produção de toneladas de pol por hectare (TPH) com investimentos em manejo varietal.

A escolha das variedades para o presente trabalho reflete uma combinação de diferentes instituições, abrangendo tanto variedades consolidadas quanto aquelas recentemente lançadas pelo setor. As instituições escolhidas, em ordem alfabética, incluem o CTC (Centro de Tecnologia Canavieira), IAC (Instituto Agrônomo de Campinas) e RB (República do Brasil), e as variedades selecionadas foram CTC2994, CTC4, CTC9006, IACCTC07-7207, RB005014, RB855156 e RB985476.

A partir dos dados do censo varietal da safra 2023/24 fornecido pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), e focando para as variedades do presente estudo, pode-se observar que entre as áreas cultivadas na região Centro-Sul do país a variedade CTC4, com 14%, é a mais cultivada, a RB855156, com 2,7%, está em décima lugar e a RB985476, com 1,9%, em décimo segundo.

Das áreas plantadas pela região Centro-Sul a CTC4 fica em terceiro lugar com 9,3%, a RB985476 em nono com 2,8%, a RB855156 com 2,3% em décimo segundo, a CTC9006 com 2,2% em décimo terceiro, a CTC2994 com 2,1% em décimo quarto

e a RB005014 com 1,9% em décimo quinto. Com relação as novas variedades, destacam-se a CTC9006 e IACCTC07-7207.

Já para o estado de São Paulo, usando o mesmo relatório do senso varietal, foi avaliado 122 empresas. O destaque do relatório, com as variedades do presente estudo, foi a CTC4 com 14% em primeiro lugar, e a RB985476 e RB855156, entre 3% cana uma, estando em nono e décimo lugar no ranking, das mais cultivadas.

Das áreas plantadas nos estado de São Paulo, a CTC4, com 9,8%, está em terceiro lugar, a RB985476, com 4,1%, em sexto lugar, a CTC9006, com 2,7%, em décimo primeiro, a RB005014, com 2,6%, em décimo segundo, a CTC2994, com 2,3%, em décimo terceiro e a RB855156, com 2,3%, em décimo quarto. Com destaque as novas variedades das áreas plantas também aparecem a CTC9006 e IACCTC07-7207.

Estes dados evidenciam que as variedades estudadas representam bem a realidade nos campos agrícolas, assim como permite a emergência de novas opções promissoras, tais como a variedade IACCTC07-7207 que foi oficialmente lançada em setembro de 2022. Destaca-se, também, a ascensão da CTC2994 entre os produtores, anteriormente conhecida nos ensaios como CT02-2994. Esta variedade tem suas raízes na mesma região do presente estudo, o município de Barrinha, estado de São Paulo, onde os primeiros cruzamentos foram conduzidos, resultando em sua formação.

De acordo com as informações fornecidas pelas instituições, as variedades selecionadas apresentam diferentes períodos de maturação: precoce (RB855156); média (RB005014, CTC4, CTC9006, RB985476); e tardia (IACCTC07-7207, CTC2994). Contudo, torna-se factível renunciar à inflexibilidade associada à recomendação tradicional de maturação ao adotar a estratégia do terceiro eixo, também conhecida como matriz tridimensional.

É relevante ressaltar esta estratégia, especialmente diante das condições climáticas desfavoráveis ocorridas, principalmente em 2014 e nos últimos 5 anos. Para que a matriz tridimensional funcione, além dos pré-requisitos de manejo adequado para a área, é necessário considerar também as diretrizes da matriz do segundo eixo, ou matriz bidimensional, priorizando a colheita de ambientes de

produção desfavoráveis (D, E) no início da safra e ambientes favoráveis (A, B) no final da safra.

A estratégia da matriz do terceiro eixo representa uma evolução no conceito de maturação ao considerar o ciclo da cultura como um todo, proporcionando uma redução à exposição aos déficits hídricos. Ao adotar essa abordagem, os canaviais mais novos são considerados cana de início de safra, visto que possuem um sistema radicular mais superficial. Cortar nos momentos de maiores déficits hídricos, que é no final da safra, prejudicaria a brotação e o perfilhamento, resultando em maior queda de produtividade entre os cortes e na redução da longevidade do canavial.

Assim, os produtores têm alcançado melhores produtividades ao colher ambientes mais restritivos e canas de primeiro corte no início da safra, postergando para o final da safra a colheita dos ambientes favoráveis, canaviais mais velhos ou áreas de reformas. Para este estudo específico, que envolve um ambiente favorável e cana de primeiro corte, a colheita foi realizada em julho de 2023, seguindo o planejamento inicial do experimento que investiga uma condição menos comum, mas que pode ocorrer, especialmente entre grandes produtores: o plantio de dois verões com colheita tardia.

1.2.4 Épocas de Plantio de Cana-de-Açúcar: Estratégias e Desafios

Além da análise das épocas de corte, é de suma importância investigar as épocas de plantio do canavial, dado que este fator desempenha um papel crucial na obtenção de uma produtividade final satisfatória (Meneses et al., 2016). No contexto do ciclo de produção, observam-se três épocas de plantio consolidadas no Centro Sul do país: plantio de 18 meses, de inverno e de verão.

Neste estudo, o planejamento incluiu o plantio convencional de 18 meses, além de uma abordagem menos comum, mas viável entre usinas e produtores de cana, conhecida como plantio de 'dois verões'. Como o próprio nome sugere, a modalidade de plantio de dois verões tem épocas de plantio semelhantes à cana de verão, mas com um ciclo que abrange mais uma estação quente, geralmente sendo colhida junto com a cana de 18 meses. Esta condição foi observada no presente estudo, em que as canas de 18 meses foram colhidas simultaneamente com as provenientes do plantio de dois verões.

Entre as épocas de plantio mais utilizadas, destaca-se o ciclo de 18 meses. Também denominado de 'cana-de-ano-meio', a fase de plantio ocorre entre janeiro e março, culminando na colheita após 18 meses. Conforme descrito por Rodrigues (1995) e Anjos e Figueiredo (2010), esse ciclo apresenta uma taxa de crescimento mínima ou quase nula nos meses entre maio e setembro, devido às condições do inverno.

No plantio de 18 meses o crescimento intensifica-se nos meses de outubro a abril, quando ocorre um aumento de luminosidade e temperaturas mais adequadas. Segundo Holanda (2010), plantios realizados em períodos com temperaturas e luminosidade mais elevadas favorecem o estabelecimento da cultura.

Uma consideração importante nos plantios de 18 meses refere-se às demandas hídricas do ciclo. Isso ocorre porque a cana de 18 meses encontra condições de déficit hídrico mais intensas durante o inverno, quando ainda está pequena e com baixa demanda hídrica. Em contraste, a cana de verão, que chega ao inverno com mais perfilhos, maior número de folhas e maior altura, tem uma demanda hídrica mais elevada e pode estar mais exposta ao déficit hídrico do que a cana de 18 meses (Resende, 2013a).

O plantio de inverno surge como resultado dos avanços em práticas de manejo, notadamente no que diz respeito à fertirrigação e irrigação suplementar. Geralmente é um o plantio realizado predominantemente entre junho e setembro, com a colheita geralmente programada para 12 meses após o plantio. Nessa abordagem, já se evidenciam resultados satisfatórios em termos de ganhos de massa, levando o setor a reconsiderar seu potencial como uma época de plantio viável (Segato et al., 2006).

O plantio de 12 meses, conhecido como 'cana de ano' ou 'de verão', ocorre entre outubro e dezembro, com a colheita prevista para 12 meses após o plantio. Em contrapartida com o de 18 meses, é uma modalidade menos frequente devido aos riscos associados às condições climáticas adversas que podem surgir durante o desenvolvimento da cultura. Coleti (1987) destaca que o impacto da estiagem, comumente entre abril e setembro, tem o potencial de exercer influência negativa sobre o manejo do plantio. Os efeitos do stress hídrico podem resultar em perdas na produtividade e qualidade da matéria prima.

Neste contexto, se as canas de ano permanecessem por mais um verão no campo, aproveitando condições ambientais propícias para o crescimento, poderiam potencialmente aprimorar sua resposta produtiva. Na prática, diversas usinas entendem que a cana de dois verões é uma cana de verão com colheita tardia ou até como cana bisada (Costa et al., 2012). Alguns relatórios, mesmo com plantio realizado como cana de verão, mas por ser colhido junto com a cana de 18 meses, também consideram como cana de 18 meses.

A cana bisada, também conhecida como cana BIS, é tipicamente conduzida em cortes mais antigos, mas em cortes que mantêm uma resposta produtiva favorável. Isso se deve ao fato de não ser economicamente viável adiar a colheita em áreas de baixa produtividade. A distinção crucial reside no fato de que a cana bisada transita de uma safra para outra sem ser colhida, permanecendo no campo por dois verões consecutivos.

Segundo Mutton (2009), a cana bisada é caracterizada como aquela que tem potencial produtivo, mas, por algum motivo, não foi colhida durante a safra. Essa diferenciação é de suma importância, pois pode ajudar a identificar uma cana planejada para ser bisada e aquela destinada a dois verões. A última modalidade é planejada intencionalmente para permanecer no campo por dois verões e ser colhida no início da safra.

Diversos motivos podem levar à decisão de não colher a cana em uma safra específica, optando por fazê-lo em outra. Essa escolha pode ser impulsionada pela necessidade de concluir a safra para iniciar a entressafra e realizar a manutenção das colhedoras. Em determinadas circunstâncias, a decisão é influenciada por fatores como o excesso de chuvas, desafios no processamento industrial, questões econômicas, entre outros (Roviero et al., 2016).

Ao analisar os relatórios gerais de produtividade elaborados pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), nota-se que as modalidades de plantio abordadas são para 18 meses, de inverno e de ano, sem uma especificação clara da cana de dois verões. Esse cenário sugere que o tema ainda é pouco explorado ou está agrupado com outras modalidades. Contudo, na prática, usinas próximas à região de Ribeirão Preto, como Batatais, da Pedra, e outras como Buriti e Alta Mogiana, têm

implementado o plantio de dois verões, alcançando ganhos satisfatórios em termos de quantidade de cana.

Normalmente recomendada para ambientes favoráveis, a cana de dois verões, plantada entre setembro e dezembro, é classificada nas análises dos benchmarking do CTC como cana de ano bis. Se essa cana de ano bis ultrapassar os 20 meses de plantio, é categorizada apenas como cana bis. Dessa forma, mesmo que a intenção deste trabalho fosse abordar a época de plantio de 18 meses e a cana de dois verões, ambas de colheita tardia, nas análises de manejo do CTC, seriam classificadas como cana de 18 meses e cana bis.

Uma cana que permanece por um período prolongado no campo pode enfrentar desafios, incluindo o acentuado acúmulo de impurezas vegetais e minerais, maior exposição a ataques de pragas, vulnerabilidade a condições adversas como chuvas intensas, com potencial para erosões, ventos fortes que representam riscos de eliminação de soqueiras, enraizamento aéreo e o surgimento de brotação lateral, bem como a ocorrência de incêndios, que conferem risco à queima dos colmos. Esses fatores podem resultar na diminuição da qualidade da matéria-prima, embora também possam propiciar um aumento no teor de fibra, contribuindo para a cogeração de energia por meio da queima do bagaço e geração de vapor (Carolo, 2009).

Fato é que nem todos os estudos demonstram uma diminuição na qualidade da matéria-prima quando se utilizam canaviais que permanecem por tempo prolongado em campo. Em um estudo conduzido por Jerônimo et al. (2015), ao compararem o rendimento da mesma variedade IAC910-1099 entre cana planta, colhida no início da safra aos 27 meses após o plantio, e cana soca, proveniente do plantio de ano, e colhida no início da safra, não foram encontradas diferenças significativas para muitas variáveis tecnológicas. Em contrapartida, a cana bisada apresentou maior quantidade de fibras e pureza em comparação com a cana soca.

1.2.5 Relações entre Emissão de gases de efeito estufa (GEE) e sistema canavieiro

O aumento das emissões de gases para a atmosfera, em especial o dióxido de carbono (CO₂), é resultado de diversos fatores históricos associados à atividade humana. Esses aumentos têm ocorrido gradualmente desde os tempos em que as

sociedades passaram a depender mais intensamente do solo para a produção de alimentos. Isso se deve ao fato de que o solo atua como um vasto reservatório de carbono, e sua gestão inadequada contribui significativamente para a emissão de CO₂.

De forma geral, a humanidade vem intensificando o efeito estufa natural, crucial para manter níveis adequados de temperatura para a vida terrestre. Esse aumento das concentrações de gases de efeito estufa (GEE) acarreta diversas consequências negativas, destacando-se o aquecimento global, mudanças climáticas, derretimento de geleiras e elevação do nível do mar, acidificação dos oceanos, perda de biodiversidade, impacto na agricultura, entre outros.

Alguns fatores têm desempenhado um papel significativo para o aumento das emissões de gases na atmosfera. Pode-se destacar o uso de fontes poluentes e não renováveis de energia como na revolução industrial com o uso do carvão vegetal no século XVIII, seguido da expansão da industrialização com o uso do petróleo e gás natural no século XIX, e com o aumento das queimas de atividades fósseis e de atividades humanas ligadas ao desmatamento no século XX.

Esses fatores têm contribuído para a crescente preocupação com a emissão de gases à atmosfera, resultando em um desequilíbrio ambiental que ameaça a vida terrestre e marinha. Como medida de controle, as organizações mundiais se reúnem, buscando acordos e incentivos para que países adotem práticas mais responsáveis em relação a esse tema, visando preservar o equilíbrio ambiental e a biodiversidade.

Um dos marcos cruciais para as mudanças ocorreu em 1972, na capital da Suécia, Estocolmo, durante a primeira grande Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento e Meio Ambiente Humano. Contudo, somente em 1992, no Rio de Janeiro, Brasil, durante a segunda edição desta conferência, também conhecida como Eco 92, foi estabelecida a UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change), ou, em português, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas. A UNFCCC instituiu um órgão central chamado Conference of the Parties (COP), que em português significa Conferência das Partes.

A primeira COP ocorreu em 1995, em Berlim, Alemanha, dando início a uma série de eventos anuais. Foi no terceiro encontro da COP, COP3, em 1997, na cidade de Kyoto no Japão, que se alcançou um marco significativo com acordos para a

mitigação de gases contribuintes para o efeito estufa. O Protocolo de Kyoto é reconhecido como o primeiro tratado internacional voltado ao controle das emissões de gases de efeito estufa na atmosfera. Neste acordo, muitos países desenvolvidos se comprometeram a estabelecer metas para a redução das emissões, com foco especial no dióxido de carbono (CO₂).

Importante destacar que o Protocolo de Kyoto permitiu a criação de processos que auxiliam a captura de carbono para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) com o MDL (Mecanismos de Desenvolvimento Limpo). Essa abordagem promoveu o setor canavieiro como uma opção altamente viável para a produção sustentável. De acordo com os autores Negrão e Urban (2021) o “sistema cana” sequestra cerca de 20% de todas as emissões de CO₂ do setor petroleiro e derivados do Brasil.

Outro ponto de grande relevância é o aumento do uso de créditos de carbono, a partir da COP3. Isso ocorre porque a cada tonelada de carbono que um país deixa de emitir à atmosfera, gera-se um crédito de carbono. Esses créditos são certificados pelo MDL, permitindo inclusive que sejam comercializados com países que não conseguiram atingir suas metas de redução.

Avanços foram observados após a COP3 com o Tratado de Kyoto, e outro marco significativo ocorreu na 21ª Conferência das Partes (COP21), realizada em 2015 em Paris, França, quando foi estabelecido o Acordo de Paris. Este acordo propôs novas metas para a redução dos gases de efeito estufa, agora incluindo países subdesenvolvidos, como é o caso do Brasil.

Em relação aos níveis de emissões de 2005, o Brasil propôs reduzir em 37% das suas emissões até 2025 e 43% até 2030 como parte do Acordo de Paris. Além disto, comprometeu-se em aumentar a participação da matriz energética com fontes renováveis, buscando restaurar áreas desmatadas e proporcionar ações de adaptação de mudanças climáticas (Brasil, 2023).

A trajetória da humanidade, marcada por desafios como pandemias, guerras, conflitos, crises econômicas e desigualdade social, configura uma rede interligada de questões que exigem abordagens holísticas e colaborativas na busca por soluções sustentáveis. Nesse cenário, as preocupações ambientais se destacam como um tema central nas agendas globais e são, frequentemente, associados às iniciativas de

grandes empresas brasileiras, que enfatizam compromissos com sustentabilidade, energia limpa e responsabilidade ambiental. O tema transcende a efemeridade dos modismos e se torna uma meta tangível, alcançável por meio de estratégias setoriais bem delineadas.

Recentemente, durante a COP28 realizada em 2023 em Dubai, o Brasil reiterou seu compromisso com as metas do Acordo de Paris. Em destaque, foi ressaltado que os principais prejudicados do aquecimento global são provenientes de nações com menores emissões de poluentes, enfatizando a urgência de uma abordagem coletiva para a descarbonização do planeta. Esse posicionamento reflete a necessidade de cooperação global para enfrentar os desafios ambientais em curso.

Torna-se, portanto, essencial concretizar a responsabilidade de alcançar as metas estipuladas pelo país. Nesse contexto, o sistema canavieiro se destaca como recurso fundamental, consolidando-se como uma fonte de energia renovável e sustentável a ser plenamente explorada. Vale destacar a produção de biocombustível renovável com o etanol, a produção de energia limpa com produção de eletricidade por meio do bagaço, a captura do carbono por meio de práticas agrícolas sustentáveis, a participação de projetos de MDL para incluir nos créditos de carbono, o avanço da tecnologia e inovação para aumentar a sustentabilidade e eficiência do sistema canavieiro.

Estudos recentes destacam a viabilidade econômica de veículos movidos a células de combustível de hidrogênio, proveniente da conversão do etanol da cana em gases. Além disso, vislumbra-se a perspectiva promissora de incorporar o etanol derivado da cana como uma forma de combustível para a aviação, integrando-se às ações voltadas para a sustentabilidade desse setor e contribuindo para a redução das emissões de carbono na atmosfera.

Muitos trabalhos também valorizam entender o CO₂ do solo, que é um dos principais gases que promovem o aquecimento desenfreado da terra (La Scala Jr et al., 2012; Moitinho et al., 2013; Iamaguti et al., 2015; Santos et al., 2019). Mas, apesar de tantos esforços, poucos estudos de CO₂ do solo envolvem relações entre variedades e épocas de plantio de cana-de-açúcar.

Sendo o fluxo de CO₂ dependente de muitos processos físicos e químicos do solo, assim como da respiração das raízes e a atividade microbiana (Lal, 2009), os

solos que têm uma atividade microbiana diferencia para cada variedade pode gerar emissão diferente. Bayer et al., 2000 cita que plantios de culturas com baixo aporte de resíduos vegetais envolvendo o pousio podem, por exemplo, facilitar a emissão do gás para a atmosfera. Para a cana, ao longo do ciclo, ocorrem fases fenológicas bem definidas, o que se espera, portanto, ter diferentes emissões de CO₂ do solo por estágio fenológico.

Aspectos como temperatura e umidade desempenham um papel significativo nas mudanças observadas nas emissões de CO₂ pelo solo ao longo do tempo, além de poder contribuir para uma maior atividade microbiana, conforme destacado por Panosso et al. (2009). Desta forma, em atividade em campo, sujeitos a diferentes condições de épocas chuvosas e períodos de frio e seco, pode ser esperar quantidades diferentes de CO₂ do solo a atmosfera.

Em sistema canavieiro, ciclos longos de 12 meses ou mais, o teor de água no solo e a temperatura variam de acordo com a estação do ano. Desta forma, a taxa de respiração microbiana pode mudar, sendo possivelmente menor com a diminuição da temperatura do solo e maior quando o teor de água e temperatura no solo é maior.

Davidson et al. 2000 observaram que no outono e inverno as taxas de respiração do solo diminuem, e com o aumento de temperatura na primavera e verão, as taxas de respiração do solo aumentam consideravelmente.

1.2.6 Indicadores espectrais na agricultura

A relação entre sensoriamento remoto e indicadores espectrais é crucial para interpretar e extrair informações valiosas a partir dos dados coletados. Cada material ou objeto tem uma assinatura espectral única, uma resposta característica à radiação em diferentes partes do espectro. Ao analisar essas respostas, é possível identificar características específicas da superfície terrestre, como, exemplos, tipos de vegetação.

O sensoriamento é uma prática antiga, sendo definida como uma arte ou ciência de se coletar informações sobre objetos sem que haja contato físico direto (Jensen, 2007). As primeiras aplicações significativas do sensoriamento remoto foram com a fotografias aéreas durante a Primeira Guerra Mundial (1914 – 1918). As aeronaves eram equipadas com câmeras para obter imagens de áreas inimigas. No

entanto, foi na Segunda Guerra Mundial (1939 – 1945) que a fotografia aérea se tornou uma ferramenta essencial para missões de reconhecimento e mapeamento.

Um marco importante para o sensoriamento remoto foi o lançamento do satélite Landsat 1 em 23 de Julho de 1972 na Estação da Força Aérea de Vandenberg, na Califórnia, Estados Unidos. Foi o primeiro satélite de uma série que se tornaria crucial para o monitoramento e mapeamento da superfície terrestre, contribuindo significativamente para o desenvolvimento do campo de sensoriamento remoto.

Desde o lançamento do Landsat 1 até o mais recente, o Landsat 9, em 16 de setembro de 2021, a missão manteve seu foco na revelação de diversos aspectos da superfície, como vegetação, solo, recursos naturais e outros propósitos científicos e práticos. Atualmente, estima-se que existam aproximadamente 9 mil satélites em órbita terrestre baixa em operação no planeta, com a previsão de adicionar mais 50 mil até 2030, conforme indicado pelo PNAS (2023).

Recentemente, uma equipe da Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA) utilizou um avião de pesquisa para coletar aerossóis na estratosfera, observando várias partículas em suspensão contendo elementos químicos que estão circundando o planeta como resultado da reentrada de satélites. Como é esperado aumento considerável do número de satélites até 2030, surgem incertezas quanto às potenciais consequências deste acúmulo de resíduos espaciais, incluindo o risco de colisões e acidentes espaciais.

O fato é que os sensores orbitais destes satélites têm grande utilidade para o sensoriamento remoto na agricultura (Formagio e Sanches, 2017), como nos que são embarcados em ARP (aeronaves remotamente pilotadas) ou VANT (veículos aéreos não tripuláveis) como os drones. O termo oficial é ARP, com uso versátil que incluem o monitoramento de incêndios, auxílio em emergências e desastres, transportes de peças, monitoramento de estruturas lineares como gasodutos e linhas de transmissão, segurança pública, pesquisas e fotogrametrias (Sarris, 2001).

Na coleta de dados para o sensoriamento remoto é crucial considerar diversas altitudes que ampliam a aplicação dessa prática. Enquanto satélites orbitais oferecem uma perspectiva em nível orbital, há também a relevância das altitudes elevadas alcançadas por foguetes, altitudes médias acessíveis por aeronaves, e altitudes baixas onde drones e helicópteros desempenham um papel fundamental.

Além disso, vale destacar que o sensoriamento remoto pode ser conduzido em nível terrestre, abrangendo ambientes controlados, como laboratórios e até situações dinâmicas, como em veículos terrestres, carros e guinchos (Formaggio e Sanches, 2017). Essa abordagem ilustra a versatilidade e a amplitude de aplicações do sensoriamento remoto em diversos contextos.

As Imagens podem ter diversos níveis de detalhamento, desde mínimos a super detalhados. Os tipos de sensores estão interligados a estes níveis de detalhamentos. Segundo Liu et al. (2013) uma sequência ascendente de sofisticação dos tipos de sensores seriam: sensores monocromáticos, RGB, espectraloradiômetros, multiespectral, hiperespectral, e com os avanços tecnológicos mais recentes, os chamados sensores ultraespectrais.

De acordo com Inamasu e Jorge (2014), os sensores RGB são sensores que operam no espectro do visível (400 a 700 nanômetros) sendo possível obter imagens que auxiliam o produtor a visualizar falha de plantio, alterações no dossel, variando resoluções de centímetros a metros, dependendo da altura de voo e lente utilizada. Alguns sensores RGB que poderiam ser embarcados no ARP, por exemplo, seriam as câmeras digitais Sony RX100 MKIII; Canon S110; Canon G9x; Sony A6000.

Para a banda da borda do vermelho (Red Edge) (intervalos de onda ,geralmente, entre 680 e 750 nanômetros), a radiação consegue penetrar na camada de folhas de forma muita mais profunda em relação à luz azul ou vermelha (Carvalho, 2019). A clorofila, que desempenha um papel crucial na fotossíntese, absorve a luz principalmente nas regiões azul e vermelha, enquanto reflete mais luz na região da borda vermelha. O uso dessas informações espectrais na região da borda vermelha se torna diferenciado para monitorar a saúde das plantas e detectar mudanças na vegetação ao longo do tempo em imagens de sensoriamento remoto.

As bandas do NIR também é uma região essencial do espectro para aplicações em sensoriamento remoto. Esta banda do infravermelho próximo (NIR – Near Infrared), com comprimentos de onda variando entre 750 e 1400 nanômetros, é particularmente valiosa para avaliar a saúde das plantas e a composição de superfícies terrestres. Neste espectro a reflectância da vegetação é influenciada, em particular, pela estrutura interna da folha, como tamanho, forma, distribuição de ar e água no interior da folha (Knox, 1997; Kumar, 1998).

Além das bandas espectrais, a agricultura faz amplo uso de índices de vegetação, sendo o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) o mais reconhecido. O NDVI é calculado pela razão entre a diferença entre o infravermelho próximo (NIR) e a banda vermelha (Red), e a soma do NIR e Red, resultando em valores variando de -1 a 1 (Rouse et al., 1973; Cordeiro et al., 2005). Quanto maior o valor do NDVI, maior a quantidade de clorofila, indicando um vigor de desenvolvimento elevado e, por conseguinte, um maior potencial produtivo para as plantas (Rissini, 2011).

Estudos que empregam o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) têm sido conduzidos para estabelecer correlações entre o conteúdo de clorofila, biomassa verde, produtividade e a incidência e severidade de doenças (Oliveira, 2015). Entretanto, uma limitação associada a este índice é a saturação de valores máximos, já que pode resultar no mesmo valor para alvos que ainda mantêm variações quando correlacionados (Myneni et al., 1995).

Apesar das limitações, o NDVI mantém sua capacidade de fornecer indicadores significativos de maneira indireta, como destacado por Cordeiro et al. (2005). Isso favorece a consideração deste indicador em estudos adicionais que envolvam questões relacionadas às emissões de gases para a atmosfera e indicadores de produtividade, dada a sua ampla aplicabilidade.

Sendo assim, considerando os desafios e possibilidades tecnológicas atuais, esse trabalho propõe a análise das emissões de CO₂ e a avaliação das respostas espectrais de sete variedades em duas épocas de plantio com o objetivo de aprimorar estratégias que proporcionem maior produtividade com um menor impacto ambiental

1.3 Referências

Anjos, IA dos; Figueiredo, PAM de (2010) Aspectos fitotécnicos do plantio. Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agronômico.

Araldi R, Silva FML, **Ono E**, Rodrigues JD (2010). Florescimento em cana-de-açúcar. **Ciência Rural** 40:694-702.

Bacchi OOS (1983) Botânica da cana-de-açúcar. In: Orlando FJ. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil. Piracicaba, IAA Planalsucar, p. 25-37.

Barbieri V; Bacchi OOS, Villa Nova NA (1979) Análise do fator temperatura média do ar no desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp). In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia...Mossoró-RN.

Bayer C, Mielniczuk J; Amado TJC, Martin-Neto L, Fernandes SV (2000) Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research** 54: 101-109.

Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (2023) Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária 2020-2030. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/publicacoes/final-isbn-plano-setorial-para-adaptacao-a-mudanca-do-clima-e-baixa-emissao-de-carbono-na-agropecuaria-compactado.pdf>. Acesso em: 3 dez. 2023.

Carolo A (2009) Aumento da cana bisada preocupa especialistas. *Jornal da Cana* 187, 19 p.

Carvalho LFD (2019) **Índices de vegetação obtidos por sensor proximal e embarcado em aeronave remotamente pilotada e sua relação com a produtividade do milho**. 91 f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

Castro PR, Kluge RA (2001) Ecofisiologia de culturas extrativas: cana-de-açúcar; seringueira; coqueiro; dendezeiro e oliveira. Cosmópolis: Editora Stoller do Brasil. 138 p.

Castro PRC (1999) Maturadores químicos em cana-de-açúcar. **Saccharum** 1: 12-16.

Coleti JT Técnica cultural de plantio. In: Paranhos SB Cana-de-açúcar: cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987. cap. 3, p. 284-328.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (2023) **ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA. Cana-de-açúcar – safra 2023/2024**, 3º levantamento de safra de cana-de-açúcar. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>>. Acesso em: 8 dez. 2023.

Cordeiro JPC, Câmara G, Moura UF, Barbosa CC, Almeida F (2005). Algebraic Formalism over Maps. In **Geoinfo**, p 49 – 65.

Costa GHG, Masson IS, Roviero JP, Mutton MJR (2012) Clarificação do caldo de cana bisada para produção de açúcar VHP de qualidade. XXIII Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Alimentos. 01 a 04 de maio - Centro de Convenções da UNICAMP - Campinas-SP, Brasil.

Cronquist A (1988) The Evolution and classification of flowering plants. 2ª ed. New York Botanical Garden, Bronx, New York, USA. 555 p.

Davidson EA, Verchot LV, Cattânio H, Ackerman IL, Carvalho EM (2000). Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern amazonia. **Biogeochemistry**.48: 53–69.

Doorenbos J, Kassam AH (1979) Yield response to water. **Irrigation and drainage paper** 33: p. 257.

Doorenbos J, Kassan AH (1994) Efeito da água no rendimento das culturas. Trad. Gheyi, H. Campina Grande: UFPB, 306p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

Fauconnier R, Bassereau D (1975) La caña de azúcar: Técnicas agrícolas y producciones tropicales. Barceloma: Blume, 433p.

Formaggio AR, Sanches ID (2017) Sensoriamento Remoto em Agricultura. São José dos Campos/SP: Oficina de Textos.

Gascho GJ, Shih SF (1983). Sugarcane. In: Teare ID, Peet MM (Ed.) Crop-water relations. New York: Wiley-Interscience, p. 445–479.

Gosnell JM, Julien HR (1976) Variations in effects of flowering on cane yield and quality. Em Proc. Seminar Sugar Cane Ripener. Orlando, FL. EEUU. p. 253-257.

Holanda LA (2010) Produtividade, índices de crescimento e eficiência no uso da água de irrigação em cana-de-açúcar UFAL, 24 p.

Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez EP, Gao X, Ferreira LG (2002) Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment** 83:195-213.

Iamaguti JL, Moitinho MR, Teixeira DD, Bicalho EDS, Panosso AR, La Scala Junior N (2015) Preparo do solo e emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo em área canavieira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 19:497-504.

Inamasu RY, Naime JM, Resende AV, Bassoi IH, Bernardi ACC (ed.) (2011) Agricultura de precisão: Resultados de um novo olhar. São Carlos/SP: Embrapa instrumentação, p. 14-26.

Jensen JR (2007) Remote sensing of the environment: Earth Resources Perspective. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2 ed., 592 p.

Knox B, Ladiges P, Evans B (1997) Biology. Sydney: Mc Graw-Hill, 225 p.

Kumar L (1998) Modeling Forest resources using geographical information systems and hyperspectral remote sensing. 246 f. Thesis (Phd.) – University of New South Wales, Sydney.

La Scala N, Figueiredo EB, Panosso AR (2012) A review on soil carbon accumulation due to the management change of major Brazilian agricultural activities. **Braz. J. Biol.** 72:775-785.

Lal R (2009) Challenges and opportunities in soil organic matter research. **European Journal of Soil Science** 60:158–169.

Lal R, Negassa W, Lorenz K (2015) Carbon sequestration in soil. **Current Opinion in Environmental Sustainability** 15: 79–86.

Landell MGA, Xavier MA, Anjos IA, Vasconcelos ACCM, Pinto LR, Creste S (2006) Potencialidades de novas variedades de cana-de-açúcar. In: Marques MO, Mutton MA, Azania AAPM, Tasso-Junior LC, Nogueira GA, Vale DW (orgs.) **Tópicos em Tecnologia Sucroalcooleira**, Jaboticabal: Gráfica Multipress Ltda., p.17-30.

Liu Y, Zhang B, Wang LM, Wang N (2013). "A self-trained semisupervised SVM approach to the remote sensing land cover classification". In Computers & Geosciences 59: 98-107.

Machado LA, Habib M (2021) Perspectivas e impactos da cultura de cana-de-açúcar no Brasil. **Artigo em Hypertexto**. Disponível em: http://www.infobibos.com/Artigos/2009_2/cana/index.htm. Acesso em: 15 nov. 2023.
Magalhães ACN (1987) Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono na planta. In: Castro PRC, Ferreira SO, Yamada T. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Assoc. Bras. da Potassa e do Fosfato. p. 113-118.

Marin FR (2003) Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos. 262 f. Piracicaba, Livre-Docência - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – Usp.

Meneses TN, Resende RS (2016). Influência de épocas de plantio na eficiência do uso da água da chuva em cultivo irrigado de cana-de-açúcar. **Irriga** 1:291.

Moitinho MR, Padovan MP, Panosso AR, La Scala Jr N (2013) Efeito do preparo do solo e resíduo da colheita de cana-de-açúcar sobre a emissão de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 37:1720-1728.

Mozambini AE, Pinto AS, Segato SV, Mattiuz CFM (2006) **História e morfologia da cana-de-açúcar**. In: Sagato SV, Pinto AS, Jendiroba E, Nóbrega JCM. Atualizações em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba, SP: Prol Editora Gráfica p.11-18.

Mutton MJR (2009) Cana bis sem planejamento tem prejudicado a safra 2009/2010. Disponível em: <http://www.brasilagro.com.br>. Acesso em: 20 de setembro 2023.

Myneni RB, Hall FG, Sellers, PJ, Marshak AL (1995) The interpretation of spectral vegetation indexes, IEEE Transactions on Geoscience, and remote Sensing 33: 481-486.

Negrão LCP, Urban MLP (2021). Álcool como “commodity” internacional. Economia e Energia. Economia & Energia, , nº 47, 2005. ISSN 1518 – 2932. Disponível em: http://ecen.com/eee47/eee47p/alcool_commodity.htm. Acesso em 17 nov 2023.

Oliveira RA, Barbosa GVS; Daros E. (org.) (2021) **50 anos de variedades RB de cana-de-açúcar**: 30 anos de RIDESA. Curitiba: UFPR, RIDESA, 199 p.

Ometto JC (1980) Parâmetros meteorológicos e a cultura da cana-de-açúcar. Piracicaba: **ESALQ**, 17p.

Panosso AR, Ribeiro CER, Zanini JR, Pavani LC, Pereira GT, La Scala N (2009) Variabilidade espacial da emissão de CO₂, da temperatura e umidade de um latossolo desprovido de vegetação sob diferentes lâminas de molhamento. Semina: **Ciências Agrárias** 30:1017-1034.

Perecin D, de Andrade Landell MG, Xavier MA, dos Anjos IA, Bidoia MAP, da Silva DN (2009) Progresso agrônomo e genético em programa de melhoramento de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Biometria** 27:279-287.

Corrado L, Cropper H, Rao A (2023) Space exploration and economic growth: New issues and horizons. **Proceedings of the National Academy of Sciences** 120: 1 – 5.

Resende RS (2013a) Irrigação de cana-de-açúcar. **Revista Canavieiros** 6: 22-26.

Rissini ALL (2011) NDVI, crescimento e produtividade de cultivares de trigo submetidas a doses de nitrogênio. 53 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava.

Rodrigues JD (1995) Fisiologia da cana-de-açúcar. Botucatu: UNESP, Instituto de Biociências. 101 p.

Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW (1974) Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **NASA Spec. Publ**, 35: p. 309.

Roviero JP, Costa GHG, dos Santos Masson I, Mutton MJR, Mutton MA, de Freitas LA (2016) Colheita mecanizada de cana bisada: influência na qualidade da matéria-prima. **Anais 10º Congresso...** Ribeirão Preto: STAB, p. 306 - 309.

Santos DMM, Figueiredo PAM, Carvalho RF (2023) Impacto dos estresses abióticos em cana-de-açúcar. Piracicaba: STAB, 395p.

Santos CA, Rezende CDP, Pinheiro ÉFM, Pereira JM, Alves BJ, Urquiaga S, Boddey RM (2019) Changes in soil carbon stocks after land-use change from native vegetation to pastures in the Atlantic Forest region of Brazil. **Geoderma** 337: 394-401.

Sarris Z, Atlas S (2001) Survey of UAV applications in civil markets. In: **IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation**. p. 11.

Segato SV, Pinto AS, Jendiroba E, Nóbrega JCM (2006) Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba, SP: ND-LIVROCERES.

da Silva Neto HF, Marques MO, Tasso Junior LC, Camilotti F, Bernardi JH (2011) Influência do florescimento e grau de isoporização na qualidade de variedades de cana-de-açúcar aptas à industrialização no meio de safra. **Bioscience Journal** (Online), 1-7.

Soares AA, Júnior JCZ (2021) O Brasil como grande player no mercado mundial de etanol. **Revista de Política Agrícola** 30:57.

Van Dillewijn C (1952). Botany of sugarcane. The Chronica Botanica Co. **Waltham, Mass.**

Vidal MF (2023) Agroindústria: Açúcar. Fortaleza: BNB Caderno Setorial Etene. 13p.

CAPÍTULO 2 - EMISSÃO DE CO₂ E SUA RELAÇÃO COM ASPECTOS DO SOLO - PLANTA - ATMOSFERA EM ÁREAS DE PLANTIO DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO: As variedades de cana-de-açúcar podem influenciar na dinâmica do carbono do solo, e desencadear em diferentes taxas de emissão de CO₂ do solo (FCO₂). O objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade temporal da emissão de CO₂ do solo (FCO₂) por meio de avaliações biométricas, características espectrais e atributos do solo em duas épocas de plantio de cana-de-açúcar, no sudeste do Brasil. Em uma área experimental, no município de Barrinha (SP), foram selecionadas sete variedades de cana-de-açúcar, desde os mais recentes aos já consagrados materiais genéticos, sendo tais variedades plantadas em novembro de 2021 e em fevereiro de 2022. Estas épocas podem ser diferentes em termos de demandas hídricas pela planta e temperaturas adequadas para o crescimento inicial das mudas de canas. O monitoramento das áreas foi seguido por investigações de biometria, do solo e análises espectrais. Observou-se que existem diferenças entre as emissões de CO₂ do solo onde cresciam as variedades, desde 8,76 a 14,48 t ha⁻¹. Os maiores valores de emissão do solo aconteceram em janeiro, mês de maior acumulado de chuva, com a cana já estabelecida, com considerável aumento de números de entrenós e emissão de folhas. Com a matriz de correlação de Pearson e o modelo de classificação por Random Forest com acurácia variando entre 73% e 83%, foram derivadas as variáveis que se destacam na compreensão de FCO₂: umidade e a temperatura do solo, altura da planta, NDVI, índice de área foliar e índice relativo de clorofila. Buscando análise preditiva das emissões, o modelo Random Forest foi o que mais se aproximou dos valores observados, com métricas variando de 64 a 84% de precisão, a erros de 0,56 a 0,95 (μmol m⁻² s⁻¹) de acurácia. Deste estudo, podem-se considerar melhores percepções quanto ao emprego do manejo varietal frente as emissões de CO₂ do solo e à definição de épocas de plantio, que, por serem previamente estimadas por modelos de aprendizado, irão nortear ações políticas do setor sucroenergético, visando a redução da emissão de CO₂ do solo nessas áreas.

Palavras-chave: mudanças climáticas, respiração do solo, aprendizado de máquinas

CHAPTER 2 - CO₂ EMISSION AND ITS RELATIONSHIP WITH SOIL-PLANT-ATMOSPHERE ASPECTS IN SUGARCANE PLANTATION AREAS

ABSTRACT The different varieties of sugarcane can influence soil carbon dynamics, and it can trigger at different soil CO₂ emission rates (FCO₂). The aim of this work was to investigate the temporal variability of CO₂ emission from the soil under aspects of the biometric, spectral and soil parameters, in two sugar cane plantation seasons. In an experimental area, in the municipality of Barrinha, State of São Paulo, seven varieties of sugar cane were selected, from the most recent to the most consecrated genetic material, such varieties being planted in November 2021 and February 2022. These seasons can be different in terms of water demands by the plant and temperatures suitable for the initial growth of sugarcane seedlings. The monitoring of the areas was followed by investigations of biometrics, soil, and spectral analysis. It was observed that there are differences between soil CO₂ emissions by variety, where the varieties grew from 8.76 to 14.48 t ha⁻¹. The highest soil emission values occurred in January, the month with the highest accumulated precipitation, with sugarcane already established and a considerable increase in the number of internodes and leaf emission. With Pearson's correlation matrix and Random Forest classification model to feature importance with accuracy ranging between 73% and 83%, the variables that stand out for understanding CO₂ emissions were soil moisture and temperature, height, NDVI, leaf area index, and relative chlorophyll index. Seeking predictive analysis of emissions, the Random Forest model was the closest to the observed values, with metrics ranging from 64 to 84% of precision, to errors of 0.56 to 0.95 (μmol m⁻² s⁻¹) of accuracy. From this study, better insights can be gained regarding the use of varietal management in relation to soil CO₂ emissions and the definition of planting times. These insights, which are estimated in advance by learning models, will guide policy actions in the sugarcane sector aimed at reducing soil CO₂ emissions in these areas.

Keywords: climate change, soil respiration, machine learning

2.1 Introdução

Atualmente, as principais espécies da cana-de-açúcar vêm de rigorosos trabalhos de multiplicação do melhoramento genético, de tal forma que se reproduzem as variedades mais produtivas. Com o advento cada vez mais frequente das mudanças climáticas, prolongando períodos secos e aumentando a temperatura média do ar, os desafios da produção agrícola tornam-se cada vez mais dependentes do conhecimento de fatores diversos como climáticos, solos e vegetativos (Ferreira Júnior et al., 2012). Esse aspecto é conhecido em diversas culturas, como na cana-de-açúcar, onde o seu desenvolvimento é relacionado a processos metabólicos que, por sua vez, tem sido afetado por eventos climáticos e condições extremas cada vez mais frequentes (Neire et al., 2015).

Embora as perspectivas de que as atuais variedades de cana-de-açúcar sejam melhores que as de anos passados, todas, sem exceção, ainda se mantêm como planta do tipo C4, que, comparadas às do tipo C3, possuem alta eficiência na taxa fotossintética e no resgate de CO₂ na atmosfera (Taiz e Zeiger, 2013). Não obstante, o programa principal de biocombustíveis do Brasil é baseado no etanol derivado da cana-de-açúcar, por sua viabilidade econômica, especialmente relacionada a alta produtividades, e seu balanço de gases de efeito estufa altamente favorável do ponto de vista da substituição do etanol de cana na gasolina (Santos, 2015).

De forma geral, no Brasil, o ciclo da cana-de-açúcar é de cinco anos (Leite et al., 2011). Isto significa dizer que, em média, após a operação de plantio, a cultura permanece, em média, 5 anos (cortes) no campo. As mudas recém-plantadas são denominadas de “cana-planta”, e, também podem ser classificadas como cana de primeiro corte. Após o primeiro corte, a cultura rebrota e, nos ciclos seguintes de corte e de rebrotação, a cana é chamada de “cana-soca” (Carvalho, 2008).

As variáveis climáticas são essenciais para atender às exigências deste cultivo (Costa et al., 2020). Em ambiente úmido e quente, o crescimento é satisfatório, e quando seco e frio, a maturação natural é favorecida. Variações destes estímulos do ambiente causados por mudanças climáticas recentes tem afetado tanto o acúmulo de sacarose, quanto a produtividade em toneladas de cana. Tudo isto, aliado ao desempenho das variedades, para se produzir mais, com maior eficiência.

A despeito de todos os esforços pouco se sabe sobre as condições destas avaliações da cana por meio de análises de emissões de CO₂ do solo ao longo do tempo. A emissão deste CO₂ do solo nos canaviais pode ser um estímulo, que, entre outros fatores, é resultado da interação entre o clima e o solo, das condições bióticas do solo e da densidade do sistema radicular (Lal, 2019; Longdoz et al., 2000).

Estudos indicam que a atividade microbiana, sob condições específicas de temperatura e de umidade do solo, está diretamente ligada às emissões de CO₂. Em adição, a respiração das raízes deve também apresentar contribuição em FCO₂ ao longo do desenvolvimento da cultura. Isto porque os períodos chuvosos e secos são determinantes no diagnóstico da emissão de gases como o CO₂ (De Lucena et al., 2022).

Logo, tornou-se importantes mais estudos relacionados ao entendimento de FCO₂ nos campos agrícolas. Neste sentido, buscou-se avaliar, ao longo do ciclo da cana-de-açúcar, sete variedades, em duas épocas de plantio, para investigar o comportamento de FCO₂ ao longo do tempo, assim como sua possibilidade de ser predito a partir de variáveis controladoras dos principais processos associados.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Área de estudo

A área localiza-se no nordeste do Estado de São Paulo, região sudeste do Brasil, no município de Barrinha. As coordenadas geográficas são 21°11'38" de latitude sul e 48°09'50" de longitude oeste. O clima da região é do tipo megatérmico, tropical com estação seca de inverno (Aw) e precipitação média de 1.400 mm, com chuvas concentradas no período de novembro a fevereiro (Thornthwaite, 1948). Esta área está inserida na província geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista, próxima ao limite das Cuestas Basálticas, no divisor litoestratigráfico arenito-basáltico (Figura 1).

Na área de experimento, foi verificada a formação Basalto Serra Geral e, de acordo com o levantamento mais recente, realizado pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), o solo foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico (LVdf.1B), textura argilosa, saturação por bases menor que 50%, teores entre 180 e

360 g kg⁻¹ de Fe₂O₃ (pelo H₂SO₄) nos primeiros 100 cm de profundidade do horizonte B, sob cultivo de cana-de-açúcar, com colheita mecanizada há mais de 20 anos.

2.2 Delineamento do experimento e característica de cada tratamento

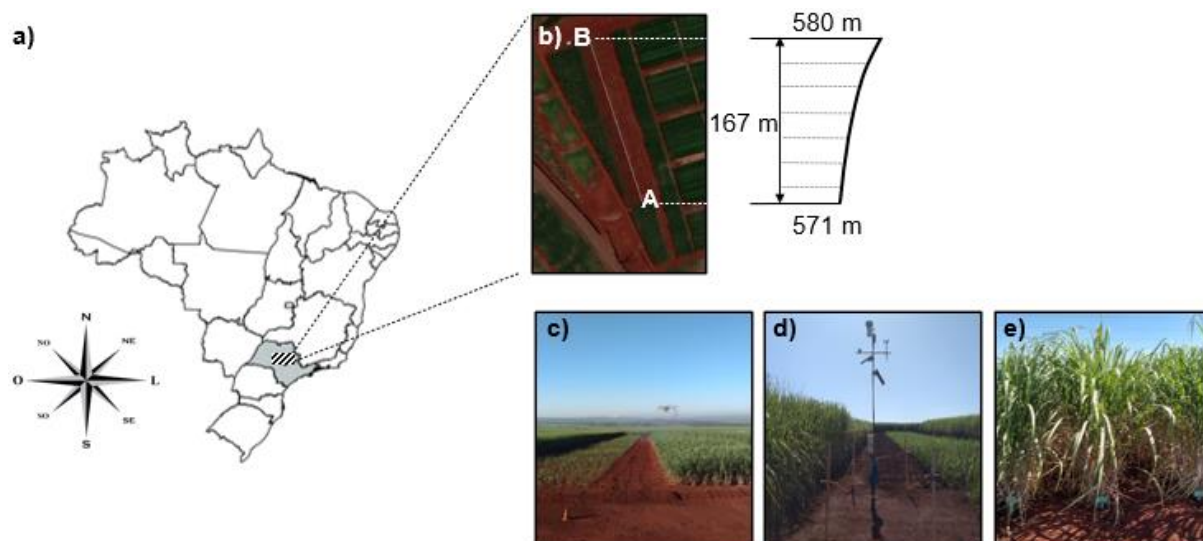


Figura 1. Localização da área de estudo: a - Município de Barrinha (São Paulo); b - perfil de elevação; c – vista aérea das áreas de plantio; d - local da estação Meteorológica; e - variedade IACCTC-7207 aos 180 dias após o plantio em novembro.

Esta pesquisa consta da instalação de dois experimentos (o primeiro plantado em novembro de 2021, e o segundo plantado em fevereiro de 2022), com sete variedades de cana-de-açúcar (CTC2994, CTC4, CTC9006, IACCTC07-7207, RB005014, RB855156 e RB985476), contrastando entre aspectos agronômicos entre outras diferenças (Tabela 1).

Tabela 1. Percepção para cada variedade quanto à expectativa agronômica de seu material genético.

Variedade	Produtividade ⁽¹⁾	Qualidade ⁽²⁾	Florescimento	Isoporização	Brotação
CTC2994	Muito Boa	Média	Ausente	Ausente	Boa
CTC4	Muito Boa	Alta	Raro	Ausente	Muito
CTC9006	Boa	Alta	Recorrente	Média	Boa
IACCTC07-7207	Muito Boa	Média	Ausente	Ausente	Muito
RB005014	Muito Boa	Média	Ausente	Rara	Muito
RB855156	Boa	Alta	Intenso	Intensa	Muito
RB985476	Muito Boa	Boa	Ocasional	Rara	Boa

Dados em conformidade com as empresas/instituições IAC, CTC e Ridesa. ⁽¹⁾Toneladas de cana por hectare (t ha⁻¹), ⁽²⁾Açúcar total recuperável (kg t⁻¹).

As duas épocas de plantio podem ser fundamentais para a compreensão do sistema de carbono do solo do qual se encontram as sete variedades de cana-de-açúcar. As canas plantadas de setembro - novembro tem máximo desenvolvimento nos meses de novembro a abril, ao contrário das canas plantadas em janeiro – abril que apresentam crescimento restrito de maio a setembro, e maior desenvolvimento de outubro a abril sob condições favoráveis de precipitação (Silvestre et al., 2019).

Após análise amostral do solo na área experimental, foram recomendadas 3 toneladas de calcário dolomítico por hectare em cada ciclo de plantio, abstendo-se da necessidade de aplicação de gesso agrícola. O preparo reduzido nos dois ciclos de plantio foi realizado em outubro de 2021, com a eliminação da soqueira das remanescentes, seguido da calagem em área total, e subsolagem apenas na linha de plantio, com linhas espaçadas a 1,5 m entre si. Após o subsolador, dias antes do plantio, foram abertos sulcos nas linhas de plantio de 0,40 m de profundidade e conjuntamente aplicados inseticidas junto aos bicos injetores do sulcador.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, com seis blocos, sendo três blocos para o plantio em novembro e três blocos para o plantio em fevereiro. Cada bloco, com sete tratamentos (variedades) e parcelas formadas por cinco linhas de 10 metros por tratamento (variedade), espaçadas a 1,5 metro entre si, totalizando 210 linhas de plantio para as duas épocas de plantio. Das cinco repetições das linhas de plantio por variedade, as avaliações do solo, das biometrias e das imagens por drones foram feitas na terceira linha com as mudas centrais. Com isto, buscou-se minimizar os efeitos de bordadura entre as variedades e entre as condições de bordadura da própria linha de plantio.

O primeiro plantio ocorreu na segunda quinzena do mês de novembro de 2021, dia 25 de novembro, e o segundo plantio, na segunda quinzena de fevereiro de 2022, dia 25 de fevereiro. Essas duas épocas distintas tiveram como objetivo aumentar as chances de variabilidade climática, já que as fases fenológicas (perfilhamento, crescimento e maturação) estarão em diferentes condições ambientais, e isto pode ser um reflexo direto em termos produtivos.

Vale ressaltar que o experimento foi com o plantio de mudas pré-brotadas (MPB), utilizando-se uma matraca com guia, onde as mudas foram plantadas a cada 65 cm entre elas. Todas as mudas deste experimento seguiram os mesmos padrões

de tratamentos; entretanto, foram selecionadas para o plantio apenas as mudas com condições de enraizamento classificadas como boas ou ótimas, que é uma classificação visual utilizada para manter o controle da qualidade das mudas. As outras classificações de mudas seriam as razoáveis e ruins. De alguma forma, é percebido que as mudas classificadas como ruins podem ter morte precoce em campo com maior facilidade que uma muda classificada como boa.

2.2.2 Avaliações biométricas em campo

Os colmos, na parte central das parcelas, foram identificados com fita, deixando espaços suficientes para que não ocorresse o estrangulamento das fitas a estes colmos. Todas as leituras eram feitas nestes mesmos locais, com as mesmas referências de colmos, exceção feita a poucos colmos desta área útil das últimas leituras, posto que alguns colmos tombados foram substituídos pelo vizinho mais próximo.

As avaliações biométricas eram realizadas em cinco colmos por tratamento, totalizando 110 colmos do plantio realizado em novembro de 2021 e 110 colmos do plantio realizado em fevereiro de 2022. Em cada colmo, mediam-se a altura do colmo até a folha +1, os diâmetros inferior, médio e superior, e o número de perfilhos. O Índice Relativo de Clorofila (IRC) foi medido na folha +1 por meio de um clorofilômetro, ClorofiLOG, modelo Falker CF L1030, e o Índice de Área Foliar (IAF) determinado pelo método indireto com o uso do sensor AccuPAR LP 80, com medições na terceira linha da parcela da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), acima do dossel e próximo do solo, entre 0,10 metros da superfície do solo.

A estação meteorológica foi instalada na parte central da área de estudos, entre o experimento de plantio em novembro e fevereiro. Esta estação foi programada para varrer os dados a cada 60 segundos e para disponibilizar dados médios e acumulados a cada 20 minutos. Um modem 3G foi conectado à estação, de modo a disponibilizar os dados de forma automática.

As variáveis observadas pela estação são a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) e a umidade relativa (%) a 80 cm do solo, a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), a umidade relativa do ar (%), a radiação solar global (W m^{-2}), a velocidade (m s^{-1}), a direção e o sentido do vento, e a precipitação pluvial (mm) a 300 cm de solo, assim como a

temperatura média do solo (°C) e a umidade do solo (em Ω) a 10; 20 e 150 cm de profundidade do solo.

2.2.3 Avaliações de imagens e análise espectral

Imagens multiespectrais foram capturadas mensalmente desde o plantio até a última avaliação dos experimentos. Foi utilizado como plataforma de sensoriamento remoto uma ARP (aeronave remotamente pilotada) com multirrotor (DJI Phantom 4 Multispectral RTK, Shenzhen, China). A ARP é equipada com uma câmera multiespectral de seis sensores, incluindo um sensor RGB e cinco sensores monocromáticos para imagens multiespectrais, a saber: Blue ($450 \pm 16\text{nm}$), Green ($560 \pm 16\text{nm}$), Red ($650 \pm 16\text{nm}$), RedEdge ($730 \pm 16\text{nm}$) e NIR ($840 \pm 26\text{nm}$).

A ARP possui sensor solar no top da aeronave para a interceptação da radiação durante o voo, garantindo, assim, dados espectrais consistentes. Além disso, a ARP é equipada com receptor de sistema global de navegação por satélite (GNSS), com correção em tempo real (RTK) (DJI D-RTK2 base station, Shenzhen, China), possibilitando adquirir dados posicionais com acurácia de $\pm 0,1\text{ m}$.

As imagens capturadas pela ARP foram processadas para construção de ortomosaicos multiespectrais por software de processamento fotogramétrico (Agisoft Metashape Professional 1.5.5, Agisoft, St. Petersburg, Russian). O conjunto de imagens de cada dia de voo foi processado individualmente, extraíndo-se as informações espectrais de cada ortomosaico, onde se pode calcular o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em linguagem R (versão 4.1.0), pelo pacote open-source “FIELDimageR” (Matias et al., 2020).

2.2.4 Determinação dos fluxos de gases, temperatura e umidade do solo

As leituras de emissões de CO_2 foram pela LI-COR Environmental series LI-8100 (Nebraska, USA), com leituras feitas entre 7 e 11 am. O tempo de leitura programado foi de um minuto e trinta segundos, totalizando 90 registros por leitura. Este sensor possui uma câmara de volume interno de $854,2\text{ cm}^3$ e contato circular de $83,7\text{ cm}^2$ no qual, acoplados em colares de PVC previamente inseridos no solo, de diâmetro de 0,10 m a profundidade de 0,30 m, eram registradas as emissões de fluxo de CO_2 . Os dados da LI-COR foram descarregados posteriormente em computador,

por meio do software Soil Flux, onde foi selecionada a melhor análise de regressão linear para capturar a emissão de CO₂ do solo para a atmosfera.

Neste meio tempo, também foram realizadas as leituras de umidade do solo na profundidade de 0,00 a 0,12 m, usando-se o TDR portátil da Campbell (Hydrosense TM, Campbell Scientific, Australia), e da temperatura do solo, por meio de um termômetro de haste inserido no solo a 5 cm do local onde foram previamente colocados os anéis de PVC.

A captura de O₂ pelo solo foi feita nos mesmos anéis de PVC que as do fluxo de CO₂, e realizada com o sensor portátil Flux UV no ambiente, com o escopo de Fluxo de 0-25% (CO₂Meter, Inc.). O tempo de leitura foi de cinco minutos, registrando capturas a cada cinco segundos de O₂, totalizando 60 registros por leitura. Este sensor Flux UV está ligado ao computador com o software GasLab®, que realizou a configuração, a calibração e os registros de leituras de dados em tempo real, mostrando, inclusive, as concentrações decrescentes deste gás no interior da câmara ao longo do tempo, podendo ser um indicador de captura de O₂ pelo solo (Almeida et al., 2018; Vicentini et al., 2019). O fluxo de O₂ foi calculado de acordo com a Equação 1:

$$FO_2(t) = \frac{dO_2}{A \cdot dt} \dots\dots\dots \text{Equação 1}$$

em que, FO₂(t) é a quantidade de O₂ medida no tempo, dO₂ é a alteração da concentração em relação a unidade de tempo (dt) no volume interno do colar cuja área em contato com o solo é A (Giacomo et al, 2014).

A concentração inicial da leitura em partes por milhão (ppm) foi transformada em gramas de O₂ absorvido por meio da relação molar. O volume medido pelo sensor UV Flux (ppm) foi convertido em mol de O₂ utilizando a equação geral dos gases (Equação 2):

$$P(\Delta V) = \Delta n(RT) \dots\dots\dots \text{Equação 2}$$

em que, V é o volume de captura de O₂ dados em ppm; P, à pressão atmosférica (Pa); T, a temperatura do ar atmosférico (K); e R a constante dos gases perfeitos (J mol⁻¹ K⁻¹).

As análises estatísticas foram realizadas pelo software estatístico R Core Team (2022), incluindo-se o uso MASS (Venables e Ripley, 2002), hier. part (Nally e Walsh, 2004), ExpDes.p (Ferreira et al., 2018), Agricolae. Foram realizadas avaliações

temporais dos fluxos de gases (FCO₂ e FO₂) , junto a temperatura e umidade do solo. As médias de cada ponto amostral para estas variáveis foram submetidas a análise de variância.

Mediante as pressuposições básicas das análises de variância, da normalidade dos erros e da homogeneidade das variâncias, foram testadas as análises estatísticas para os fluxos de CO₂ e O₂, temperatura do solo e umidade do solo, usando-se a comparação das médias ao longo do tempo para os diferentes tratamentos (variedades), pelo teste de LSD (Least Significant Difference), ao nível de 5% de probabilidade.

Também foi estimada a matriz de correlação de Pearson com nível de confiança de 95% ($p < 0,05$), modelo de classificação por Random Forest para ordem de importância dos atributos e aprendizado indutivo supervisionado por regressão com os modelos de Árvores de decisão, Random Forest e Support Vector Machine.

2.2.5 Avaliação e validação dos modelos

Foram medidos um total de 2774 leituras de emissão de CO₂ do solo, sendo 1387 leituras para o plantio realizado em novembro, e 1387 para o plantio realizado em fevereiro. Nestes dados, utilizou 70% para o treinamento e 30% para o teste dos modelos. Para aprendizagem indutiva supervisionada foi usado o software Python com os pacotes do Scikit-learn para preparação, normalização, construção do conjunto treino/teste, otimização dos hiperparâmetros e métricas de avaliação.

Os modelos de aprendizado de máquinas utilizados, visando a predição de CO₂ foram de Árvores de decisão (DT), Random Forest (RF) (Breiman, 2003) e Support Vector Machine (SVM). Os valores dos ajustes para os hiper parâmetros ótimos podem ser vistos pela Tabela 2.

Os processos de ajustes e modelagem foram usados apenas no processo de treinamento, com os dados disponíveis no conjunto do treinamento. Os ajustes dos modelos foram avaliados de acordo com o coeficiente de determinação (R^2) e raiz quadrada do erro médio (RMSE). Vale ressaltar que a avaliação destes modelos foi feita no conjunto teste, e estes valores dos testes não tiveram participação no processo de treino do modelo.

Tabela 2. Parâmetros ajustados buscando obter modelos com melhores desempenhos.

Modelos	Parâmetros	Nov e Fev	Nov	Fev
Árvores de decisão	Profundidade máxima da árvore	14	14	6
	Número mínimo de observações necessárias para dividir um nó interno	10	15	24
	Número mínimo de observações necessárias para cada nó da folha	11	4	14
Random Forest	Número de árvores	250	350	350
	Porcentagem dos atributos para a divisão	30%	40%	30%
	Profundidade máxima da árvore	35	25	40
Support Vector Machine	Cost	0,1	10	100
	Gamma	1	0,01	0,01

Nov, plantio de novembro; Fev, plantio de fevereiro.

O R^2 é um coeficiente que varia de 0 a 1, e quanto mais próximo de 1, mais preciso está o modelo. Para avaliar a acurácia do modelo, foi usado o indicador de raiz quadrada do erro médio (RMSE), que, apesar de variar de 0 a 1 como o R^2 , quanto mais próximo de 0 mais acurado está o modelo.

2.3 Resultados e Discussão

A análise de variância de medidas repetidas no tempo para FCO₂, quando avaliadas isoladamente, em função das variedades de cana-de-açúcar, indicou significância tanto ao plantio realizado em novembro ($F=10,13$; $p<0,0001$), como em fevereiro ($F=41,56$; $p<0,0001$). As maiores médias de emissões de FCO₂ aconteceram nas variedades CTC4 ($4,03 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), IACCTC07-7207 ($3,92 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e RB005014 ($3,91 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para o plantio de novembro, e RB005014 ($4,44 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e RB985476 ($4,39 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para o plantio de fevereiro (Tabela 3).

Para a umidade do solo, não foram encontradas diferenças significativas entre as variedades para o plantio de novembro, mas para fevereiro as maiores médias foram para as variedades RB855156 (21,92%), RB985476 (21,54%) e CTC2994 (20,45%). No entanto, para a temperatura do solo, ambos os plantios mostraram diferenças entre as variedades, com maiores valores para RB985476 (22,29 °C) e RB855156 (22,1 °C), para o plantio realizado em novembro e para RB005014 (23,00 °C), RB855156 (22,98 °C) e CTC9006 (22,95 °C), para o plantio realizado em fevereiro. Observar-se coeficientes de variação mais baixos nas variáveis analisadas para o plantio feito em fevereiro.

Tabela 3. Desdobramento da interação entre as variedades de cana-de-açúcar para emissão de CO₂ do solo, temperatura e umidade do solo.

Novembro	FCO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹)			Us (%)			Ts (°C)		
Variedade	Média	EPM	CV	Média	EPM	CV	Média	EPM	CV
2994	3,85b	0,14	51,57	19,43a	0,72	52,00	22,12d	0,18	11,57
CTC4	4,03a	0,14	47,91	18,82a	0,69	51,88	22,23bc	0,19	11,73
9006	3,85b	0,13	48,22	19,05a	0,67	49,43	22,05d	0,21	13,42
7207	3,92a	0,12	42,84	18,24a	0,71	54,42	22,03d	0,19	11,82
5014	3,91a	0,11	39,98	19,15a	0,72	53,17	22,16ab	0,20	12,65
5156	3,69b	0,11	42,48	19,16a	0,74	54,12	22,13c	0,19	12,34
5476	3,42c	0,10	43,14	19,02a	0,70	51,97	22,29a	0,19	12,15
Fevereiro	FCO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹)			Us (%)			Ts (°C)		
Variedade	Média	EPM	CV	Média	EPM	CV	Média	EPM	CV
2994	4,17b	0,09	31,21	21,40a	0,66	43,32	22,90c	0,13	8,16
CTC4	4,07b	0,10	33,06	20,45bc	0,70	48,05	22,91bc	0,12	7,42
9006	3,81c	0,07	27,12	20,03c	0,62	43,57	22,95abc	0,13	7,79
7207	3,83c	0,09	33,31	20,88b	0,66	44,36	22,90c	0,13	7,78
5014	4,44a	0,10	32,19	20,72b	0,68	46,10	23,00a	0,14	8,78
5156	3,61d	0,07	28,55	21,92a	0,72	45,95	22,98ab	0,13	7,87
5476	4,39a	0,10	32,18	21,54a	0,65	42,66	22,87c	0,13	7,84

N=198 amostragens por variedade em cada época; FCO₂, Fluxo de CO₂ (μmol m⁻² s⁻¹); Us, umidade do solo (%); Ts, temperatura do solo (°C); EPM, erro padrão da média (±); CV, coeficiente de variação (%); 2994, CTC2994; 9006, CTC9006; 7207, IACCTC07-7207; 5014, RB005014; 5156, RB855156; 5476, RB985476. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si, pelo teste LSD, ao nível de 5% de probabilidade.

Pela Figura 2 pode-se identificar as médias das emissões de CO₂ mensais por parcela, em cada variedade. Tanto para o plantio de 25 de novembro como o de 25 de fevereiro, nota-se que os períodos chuvosos e secos influenciam nas emissões de CO₂, de maneira que aumentam no verão e diminuem no inverno. Estudo realizado em variedades de cana-de-açúcar com manejo de preparos e resíduos da colheita também corroboram estes resultados, na medida em que se evidenciaram diferenças de emissões de CO₂, quando em solos sob condições de umidades diferentes (Moitinho et al., 2013).

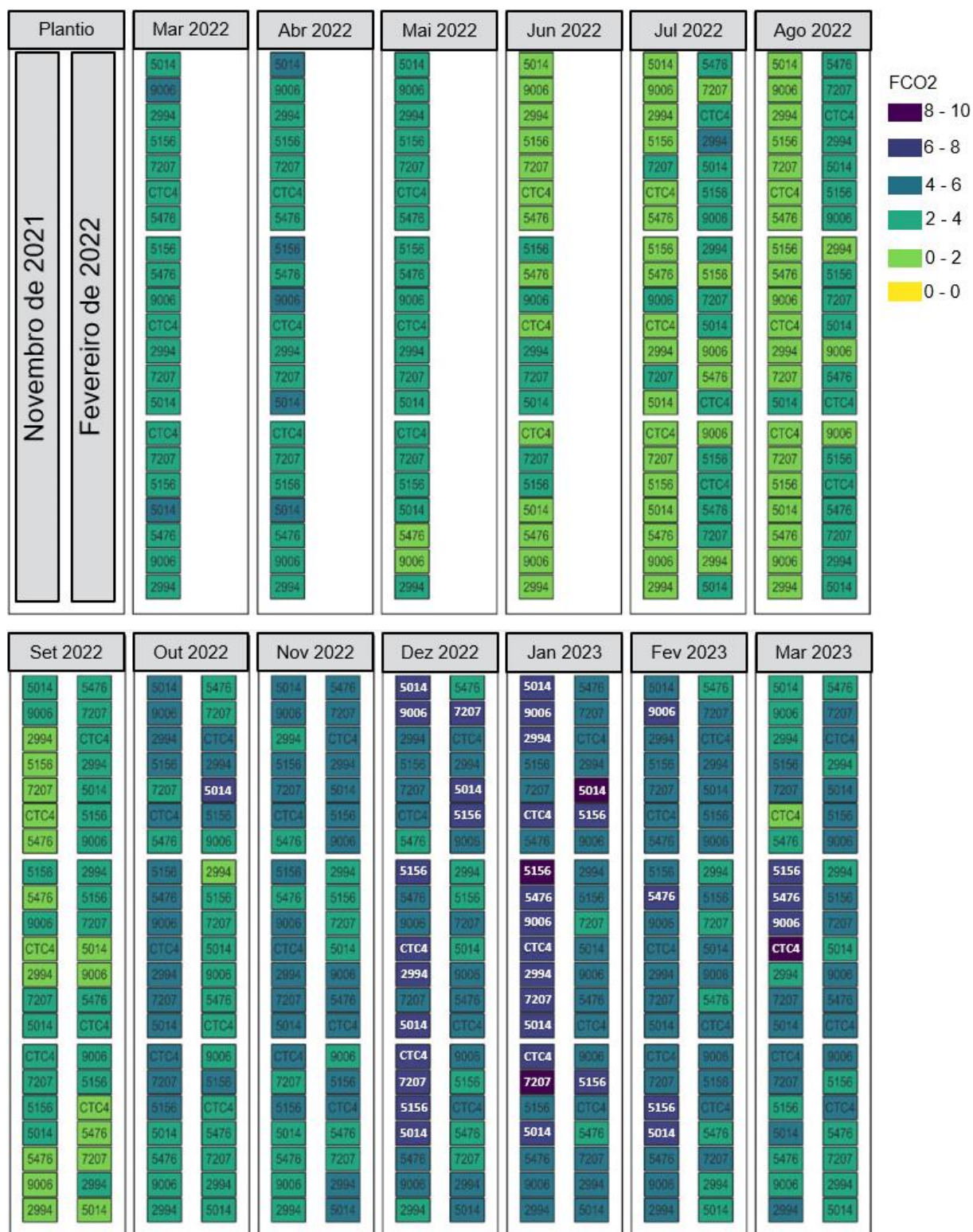


Figura 2. Média dos valores medidos da emissão de CO₂ do solo ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para o mês de avaliação das parcelas experimentais nas 7 variedades de cana-de-açúcar em duas épocas de plantio. FCO₂, Fluxo de CO₂ do solo ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 2994, CTC2994; 9006, CTC9006; 7207, IACCTC07-7207; 5014, RB005014; 5156, RB855156; 5476, RB985476

Importante salientar que as medições dos fluxos de gases de CO₂ e O₂ do solo ocorreram após o recobrimento do solo, na operação conhecida como quebra lombo. Esta operação, além de ser usada como manejo de plantas daninhas (Silva et al., 2018), acontece após a completa emergência ou estabelecimento da cultura, e serve para uniformizar a área dos sulcos que foram abertos no plantio.

Para o plantio de novembro, os primeiros meses de leitura já faz referência as variedades mais perfilhadas, como foi o caso da variedade IACCTC07-7207, que apresentava entrenós visíveis antes que outras variedades. Nessa situação, as emissões de CO₂ do solo oscilaram entre 4 e 6, a 6 e 8 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Figura 2). Ao observar os períodos mais críticos de estresse hídrico, no mês de agosto, as canas do plantio de novembro, já bem formadas, emitiram, no geral, menos emissões (0 e 2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) que as canas em formação advindas do plantio de fevereiro (2 e 4 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Fato que a planta, quando submetida a estresse abiótico, consegue desenvolver mecanismos de defesa, que envolve alterações fisiológicas, bioquímicas e moleculares em respostas as estresse hídrico. (Lenka et al., 2011; Pérez-Clemente et al., 2013). Estes estresses dependem da variedade, do estágio de desenvolvimento, da intensidade e duração do estresse (Santos e Carlesso, 1998).

Os valores médios dos efluxos de CO₂ e influxo de O₂ do solo pelas variedades nas duas épocas de plantio (Figura 3) demonstram algumas diferenças de valores, mas não de comportamento, corroborando os resultados da Figura 2, posto que nos períodos chuvosos aumenta o metabolismo respiratório de ambas as épocas de plantio (Figura 3).

No entanto, é factível observar que as canas plantadas em novembro chegam no período seco provavelmente com potencial de raiz mais profundo, com canas já estabelecidas, situação opostas as canas plantadas em fevereiro. Mínimas observadas de 1,57 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de emissão de CO₂ para agosto, nas canas de plantio de novembro, e de 2,16 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para as canas de fevereiro (Figura 3). E o influxo de O₂ do solo acompanhando os efluxos de CO₂ do solo em todo ciclo, de maneira que o aumento de um leva também o aumento do outro.

A alta emissão de CO₂ do solo em janeiro de 2023, que é o segundo verão para as canas plantadas em novembro de 2021, e o primeiro verão para as canas plantadas

em fevereiro de 2022, são seguidas de altas emissões de CO₂ e capturas de O₂ do solo. São nestas fases de condições climáticas mais favoráveis para o crescimento do colmos, surgimentos de novos perfilhos, aumento do sistema radicular, que são observados os períodos com mais fluxos de gases em ambas as épocas de plantio.

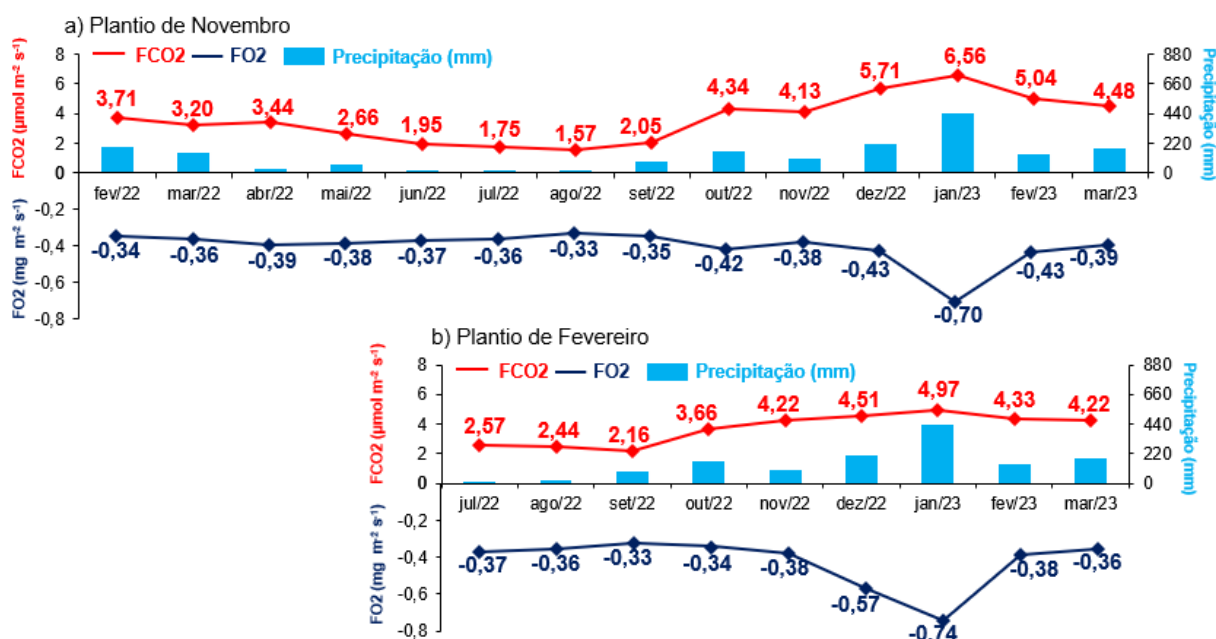


Figura 3. Média mensal do efluxo de CO₂ do solo ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e influxo de O₂ ($\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para todas as variedades de cana-de-açúcar em duas épocas de plantio.

As variações das emissões de CO₂ do solo ao longo do tempo podem estar relacionado a taxa respiratória das variedades de cana-de-açúcar. Chi et al. (2021) destacam que além de estar relacionado a oxidação da matéria orgânica do solo e a respiração das raízes, fatores ambientais como temperatura e umidade do solo afetam as taxas de emissões do dióxido de carbono.

Quando os valores dos fluxos de CO₂ e O₂ do solo estão mais altos, pode-se inferir que o metabolismo está em ritmo acelerado. Desde que a respiração das raízes esteja mais intensa, espera-se que esteja ocorrendo no solo melhor absorção de nutrientes e água, com posterior, aumento de expectativa de maior produtividade (Awasthi et al., 2022).

Existem correlações lineares positivas entre as variáveis estudadas (Figura 4). Para o cenário conjunto de ambos os plantios, de novembro e fevereiro, as maiores correlações com as emissões de CO₂ do solo foram para a temperatura do solo, ($r =$

0,58), umidade do solo ($r = 0,56$) e NDVI ($r = 0,55$), além das relações positivas com altura ($r = 0,47$), IRC ($r = 0,45$) e fluxo de O_2 ($r = 0,38$).

De forma geral, muitas correlações com a emissão de CO_2 do solo foram positivas (tais como temperatura do solo, umidade do solo, altura, NDVI e IRC), em todos os plantios, quando avaliados separadamente (Figura 4). Pelo viés de influxo de O_2 , as correlações entre FCO2 e FO2 podem ser em decorrência das atividades biológicas do solo, que sob umidade adequada, elevam o consumo de O_2 assim como a emissão de CO_2 .

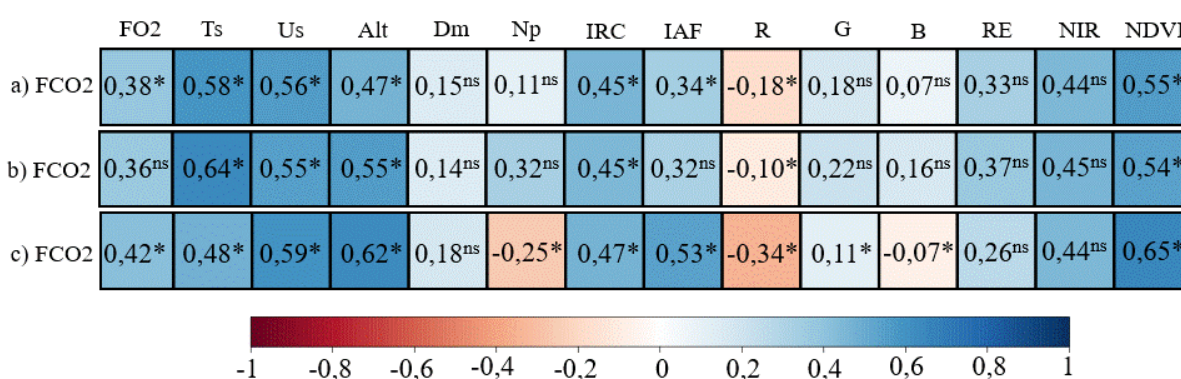


Figura 4. Correlação linear de Pearson para as avaliações biométricas, espectrais e do solo. O intervalo de confiança foi de 95%, o nível de significância adotado foi de ($p < 0,05$). a) dados com plantio de novembro e fevereiro; b) dados do plantio de novembro; c) dados do plantio de fevereiro. Alt, altura (cm); Dm, diâmetro médio do colmo (mm); Np, número de perfilhos; IRC, índice relativo de clorofila; IAF, índice de área foliar; FCO2, emissão de CO_2 do solo ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$); FO2, captura de O_2 ($mg\ m^{-2}\ s^{-1}$); Ts, temperatura do solo ($^{\circ}C$); Us, umidade do solo(%); B, índice espectral na faixa do azul; R, vermelho; RE, borda do vermelho; NIR, infravermelho próximo; NDVI, Índice de vegetação da diferença normalizada.

Ainda sob a umidade do solo, observou-se que, em períodos chuvosos, o número de perfilhos e a altura da planta aumentavam de valor. Este crescimento foi captado pelo aumento dos índices relativos de clorofila (IRC). Esta variação biométrica pode ser um reflexo das atividades de crescimento das raízes que acontecia nos solos. Tal fato promoveu variações no solo de tal modo a influenciar nos aumentos das emissões de CO_2 e das capturas de O_2 entre as variedades na época chuvosa.

Ainda é de se destacar que o sombreamento nas entrelinhas, causadas pelo fechamento do dossel, podem também ter influenciado as emissões de CO_2 do solo. Isto porque há estudos demonstrando que em áreas onde ocorre o sombreamento, as

emissões podem ser diferentes, visto que, sob a exposição da luz solar pode ocorrer inibição da atividade microbiana (Vicentini et al., 2019).

Este fator de sombreamento aconteceu, principalmente, na variedade mais ereta do experimento, e que mais sombreou a entre linha, que foi a variedade IACCTC07-7207. Em áreas de plantio de fevereiro, esta variedade foi a que teve os menores valores para emissão de CO₂ do solo, não acontecendo o mesmo para as plantadas em novembro (Tabela 3). Desta forma, as parcelas onde desenvolvem as variedades podem ter características próprias que são atribuídas a cada variedade, favorecendo ou penalizando as emissões de CO₂ do solo.

Correlações negativas foram observadas entre a banda espectral Red e emissão de CO₂ do solo em todas as épocas de plantio (Figura 4). A maior correlação negativa aconteceu, inclusive, entre o Red e a emissão de CO₂ ($r = -0,34$), para o plantio de fevereiro. Já para o NDVI as correlações foram todas positivas com as emissões de CO₂ do solo.

Os valores do NDVI podem captar o comportamento da clorofila ao absorver luz na faixa do visível, mantendo relação direta com os processos fotossintéticos. Pelo experimento, também se observa, que assim como aconteceu com o NDVI, o índice relativo de clorofila (IRC) correlaciona positivamente com as emissões de CO₂ do solo (Figura 4).

Como esperado, o algoritmo Random Forest conseguiu associar, por ordem de importância, os atributos que mais estão associados às emissões de CO₂ (Figura 5). O algoritmo foi, assim, capaz de distinguir que, de forma geral, associando dados conjuntos para os plantios de novembro e fevereiro, a umidade e a temperatura do solo, a altura e NDVI têm muita relação com a emissão de CO₂.

No entanto, para o plantio de novembro, o índice de área foliar (IAF) e índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) trazem, também, alta importância para esta finalidade de mensurar a emissão de CO₂, assim como, para o plantio de fevereiro, reforçando o atributo altura como indicador selecionado para esta finalidade

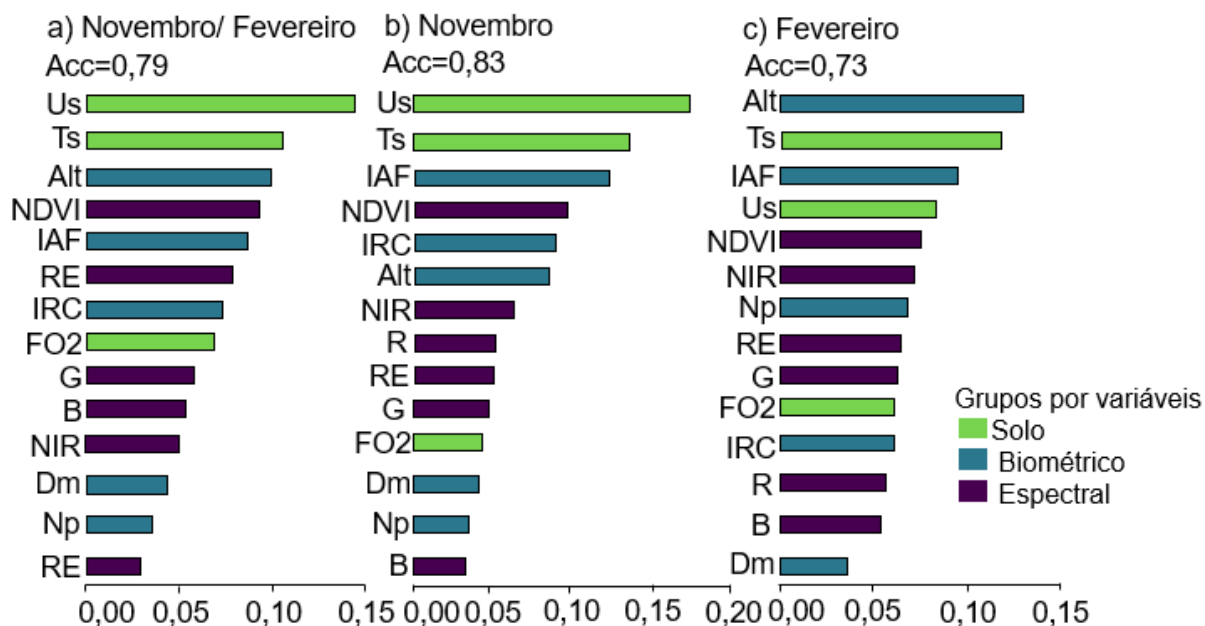


Figura 5. Importância do atributo que influencia o FCO₂ na cana-de-açúcar selecionado pela melhor acurácia no modelo de classificação por Random Forest. a) Plantio em novembro e fevereiro; b) Plantio de novembro; c) Plantio de fevereiro. Acc, acurácia; Alt, altura (cm); Dm, diâmetro médio do colmo (mm); Np, número de perfilhos; IRC, índice relativo de clorofila; IAF, índice de área foliar; FCO₂, efluxo de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); FO₂, influxo de O₂ ($\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); Ts, temperatura do solo ($^{\circ}\text{C}$); Us, umidade do solo(%); B, índice espectral na faixa do azul; R, vermelho; RE, borda do vermelho; NIR, infravermelho próximo; NDVI, Índice de vegetação da diferença normalizada

A umidade e temperatura do solo traz muita informação para o modelo, até mais que o fator de captura de O₂ (Figura 5). Outras variáveis importantes foram à altura, que pode interferir no sombreamento da entrelinha, o IAF, também relacionado ao sombreamento das entrelinhas, e o NDVI, muito relacionado a leitura do dossel da cana. Todos estes fatores têm se mostrado importantes para a compreensão da emissão de CO₂ em diferentes épocas de plantio.

Neste sentido de buscar estimar o fluxo de CO₂ nas condições do experimento, foram testados três modelos de regressão de aprendizado supervisionados de máquinas: Árvores de decisão, Random Forest e Support Vector Machine (Figura 6). Os resultados destes modelos indicam estimativas próximas ao valor observado, com coeficiente de determinação mínimo de 0,64 (Figura 6a) e máximo de 0,84 (Figura 6e). Os melhores modelos, na sequência, foram: Random Forest, seguidos do Support Vector Machine e depois Árvores de decisão.

Embora o R^2 seja um excelente indicador métrico para a precisão, neste estudo, o melhor R^2 não acompanhou a melhor acurácia (Figura 6). O menor valor para a raiz quadrada do erro médio foi de 0,56 (mais acurado dos modelos), embora tenha 0,77 (terceiro maior entre os modelos) de coeficiente de determinação.

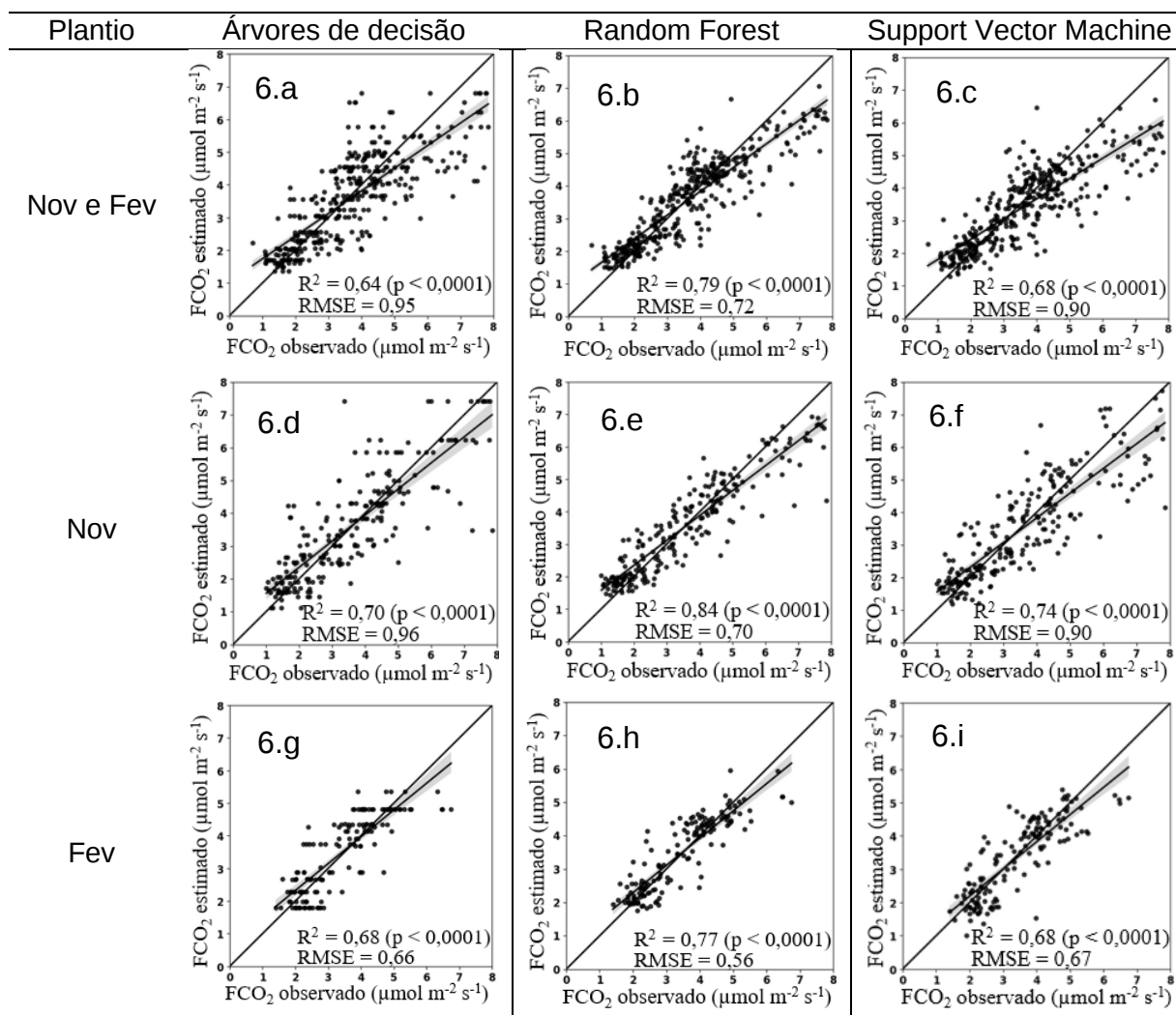


Figura 6. Gráficos de desempenhos dos modelos seguidos pela métrica de precisão (R^2) e acurácia (RMSE). nov, novembro; fev, fevereiro.

No entanto, para a época de plantio de novembro, os três modelos tiveram melhor desempenho do que na época de plantio de fevereiro e do conjunto novembro e fevereiro (Figura 6). Isto pode ocorrer devido à variabilidade temporal ser mais percebida para a época de plantio de novembro, visto que passou por dois verões (2021 e 2022), ao contrário de apenas um (verão de 2022), do plantio realizado em

fevereiro. Como o fluxo e variação da emissão de CO₂ é maior em período chuvoso, mais chances os modelos tiveram de captar estas variações.

Desta forma, embora verifica-se similaridades entre os modelos, os resultados diferem-se quanto a métricas de avaliação, e talvez, novos resultados viriam se fossem empregados outros modelos de aprendizado, tais como: redes neurais, bagging e XGBoost. No entanto, toa percepção em campo deveria ser incluída nos modelos, de forma a buscar sempre um melhor desempenho entre os estimados e os observados.

2.4 Conclusões

A variabilidade temporal das emissões de CO₂ entre as variedades de cana-de-açúcar mostrou que as variedades mais recentes, tais como IACCTC07-7202, CTC9006 e CTC2994, podem apresentar emissões de CO₂ menores, quando comparadas as variedades consolidadas no mercado, tais como: CTC4, RB855156, RB005014 e RB985476. Entretanto, todas as variedades estão sujeitas às variações climáticas para maior ou menor resposta, sendo que, no verão, ocorre aumento e no inverno, diminuição das emissões de CO₂.

A matriz de correlação de Pearson, avaliando atributo por atributo, teve respostas similares quanto à ordem de importância pelo modelo de classificação por Random Forest, sendo as variáveis umidade e temperatura do solo, NDVI, altura, índice relativo de clorofila e índice de área foliar correlacionadas positivamente e classificadas como muito importantes para o entendimento da emissão de CO₂ para os plantios de novembro e fevereiro.

Os modelos de aprendizagem indutivo supervisionados por regressão (Árvores de decisão, Random Forest e Support Vector Machine) foram capazes de simular o fluxo de CO₂ nas épocas de plantio à partir de atributos biométricos, espectrais e do solo. O modelo Random Forest apresentou o melhor desempenho entre eles. O impacto destas previsibilidades será importante para ajudar nas políticas públicas globais, sobretudo para as metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

2.5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo da Unesp, Câmpus de Jaboticabal, e à Usina São Martinho, Pradópolis (SP), que forneceram os recursos necessários para garantir o sucesso desta pesquisa.

2.6 Referências

Almeida RF, Teixeira D de B, Montanari R, Bolonhezi AC, Teixeira EB, Moitinho MR, Panosso AR, Spokas KA, La Scala Jr N. The ratio of CO₂ and O₂ as index for categorizing soil biological activity in sugarcane areas under contrasting straw management regimes. *Soil Research*. 2018; 56: 1-10. DOI:10.1071/SR16344.

Awasthi SK et al (2022) Multi-criteria research lines on livestock manure biorefinery development towards a circular economy: from the perspective of a life cycle assessment and business models strategies. **Journal of Cleaner Production** 341:1-20

Breiman L (2003) Statistical modeling: The two cultures. **Quality control and applied statistics** 48: 81 – 82.

Carvalho LA, Neto VJM, Silva LF, Pereira JG, Nunes WAGA, Chaves CHC (2008) Resistência mecânica do solo à penetração (RMP) sob cultivo de cana-de-açúcar, no município de Rio Brilhante-MS. **Agrarian** 2: 7-22.

Chi NTL, Anto S, Ahamed TS, Kumar SS, Shanmugam S, Samuel MS, Mathimani T, Brindhadevi K, Pugazhendhi A (2021) A review on biochar production techniques and biochar based catalyst for biofuel production from algae. **Fuel** 287: 1-9.

Costa RL, Baptista GMM, Gomes HB, Silva FDS, Rocha Junior RL, Salvador MA, Herdies DL (2020) Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. **Weather and Climate Extremes** 28: 1-21.

De Lucena WB, Vicentini ME, Santos GAA, Silva BO, Da Costa DVM, Canteral KFF, Román JAN, Rolim GS, Panosso AR, La Scala Jr N (2023) Temporal variability of the CO₂ emission and the O₂ influx in a tropical soil in contrasting coverage conditions. **Journal of South American Earth Sciences** 121: 1 – 10.

Ferreira Junior RA, Souza JL, Lyra GB, Teodoro I, Santos MA, Porfirio ACS (2012) Crescimento e fotossíntese de cana-de-açúcar em função de variáveis biométricas e meteorológicas. **Revista Brasileira de engenharia agrícola e ambiental** 16: 1229-1236.

Lal R (2009) Challenges and opportunities in soil organic matter research. **European Journal of Soil Science** 60: 158 – 169.

Leite GHP, Crusciol CAC, Silva MA (2011) Desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar após aplicação de reguladores vegetais em meio de safra. **Semina: Ciências Agrárias** 32:129-138.

Lenka SK, Katiyar A, Chinnusamy V, Bansal KC (2011) Comparative analysis of drought-responsive transcriptome in Indica rice genotypes with contrasting drought tolerance. **Plant biotechnology journal** 9: 315-327.

Longdoz B, Yernaux M, Aubinet M (2008) Soil CO₂ efflux measurements in a mixed forest: impact of chamber disturbances, spatial variability, and seasonal evolution. **Global Change Biology** 6: 907 – 917.

Matias FI, Harter MVC, Endelman JB (2020) FIELDimageR: An R package to analyze orthomosaic images from agricultural field trials. **The Plant Phenome Journal** 3: 1 – 6.

Moitinho MR, Padovan MP, Panosso AR, La Scala Jr N (2013) Efeito do preparo do solo e resíduos da colheita de cana-de-açúcar sobre a emissão de CO₂. **Revista Brasileira Ciência do Solo** 37: 1720–1728.

Nally RM, Walsh CJ (2004) Hierarchical partitioning public-domain software. **Biodiversity & Conservation** 13: 659–660.

Neira J, Ortiz M, Morales L, Acevedo E (2015) Oxygen diffusion in soils: Understanding the factors and processes needed for modeling. **Chilean Journal of Agricultural Research** 75:35-44.

Pérez-Clemente RM, Vives V, Zandalinas SI, López-Climent MF, Muñoz V, Gómez-Cadenas A (2013) Biotechnological approaches to study plant responses to stress. **BioMed research international**, 2013: 1 - 10.

R Core Team (2020) In: R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

Santos DJPBS dos (2015). **Geopolítica energética e o mercado internacional do etanol**. 101 f. Dissertação (Mestrado em Geografia Humana) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. Acesso em: 12 Jun 2023.

Santos RF, Carlesso R (1998) Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 2: 287-294.

Segato SV, Mattiuz CFM, Mozambani AE. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar, In: Segato, S. V.; Pinto, A. S.; Jendiroba, E.; Nóbrega, J. C. M. Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: ESALQ, 2006. p. 19-36.

Silva GS, Silva AFM, Giraldele AL, Ghirardello GA, Victoria Filho R, de Toledo REB (2018) Manejo de plantas daninhas no sistema de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Herbicidas** 17: 86-94.

Silvestre NG, Vieira GHS, Nascimento DP (2019) Estimativa da melhor época de plantio e produtividade de cana-de-açúcar com o modelo agrometeorológico aquacrop. **Revista Ifes Ciência** 5: 197-207.

Taiz L, Zeiger E (2013) Fisiologia vegetal. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 526 p.

Thornthwaite CW, Mather JR (1957) Instruções e tabelas para a computação a evapotranspiração potencial e do Balanço Hídrico. **Drexel Institute of Technology** 10: p.311.

Venables WN, Ripley BD (2002) In: Modern Applied Statistics with S-PLUS. Springer Science & Business Media.

Vicentini ME, Pinotti CR, Hirai WY, Moraes MLT, Montanari R, Teixeira Filho MCM, Milori DMBP, La Scala Jr N, Panosso AR (2019) CO₂ emission and its relation to soil temperature, moisture, and O₂ absorption in the reforested areas of Cerrado biome Central Brazil. **Plant and Soil** 444: 193–211.

CAPÍTULO 3 - RELAÇÕES ENTRE INDICADORES DE PRODUTIVIDADE E ESPECTRAIS EM ÁREAS DE PLANTIO DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO O avanço de tecnologias embarcadas no sensoriamento remoto ampliou as possibilidades de características diversas do canavial. Desta forma, propõe-se neste trabalho, avaliar indicadores de produtividade da cana-de-açúcar, utilizando indicadores espectrais de sete variedades, em duas épocas de plantio. A área experimental localiza-se no município de Barrinha (SP), com o plantio de dois verões realizado em 25 de novembro de 2021 e o plantio de 18 meses em 25 de fevereiro de 2022, ambos seguindo o delineamento em blocos casualizados. O canavial foi monitorado ao longo de todo o ciclo in situ por meio de avaliações biométricas, índices de clorofila e de área foliar, bem como com voos aéreos por meio de uma Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) equipada com câmera multiespectral. Uma estação meteorológica automática, na área central do experimento, registrou as condições climáticas ao longo do experimento. Momentos que antecederam à colheita mecanizada com célula de carga no transbordo, foram retiradas amostragens para análises de solo e feixes de cana para análise tecnológica. Diferentes valores de toneladas de cana por hectare (TCH), açúcar total recuperável (ATR) e toneladas de açúcar por hectare (TAH) foram encontrados entre as variedades e épocas de plantio. A cana de dois verões teve maior produtividade em TCH, com relações significativas entre o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e produtividades mais distribuídas ao longo do ciclo. Por outro lado, as canas de plantio de 18 meses tiveram correlações significativas com o TCH e ATR em momentos que antecederam a colheita. Por meio de modelos de regressões lineares para capturar os indicadores de produtividade, foi observado métricas variando de 20 a 62% de precisão, a erros de acurácia entre 2,59 (TAH) e 22,76 (TCH). A banda do vermelho foi a mais indicada para estimar a produtividade com 0,62 de precisão. Desta forma, percepções aprimoradas de épocas de plantio, comportamento do canavial e uso estratégico de bandas espectrais visando produtividades podem ser considerados na construção de planejamento de canavial de alta performance.

Palavras - chave: sensoriamento remoto, relações entre atmosfera – solo – planta, modelagem matemática

CAPÍTULO 3 - RELATIONSHIPS BETWEEN PRODUCTIVITY INDICATORS AND SPECTRAL CHARACTERISTICS IN SUGARCANE PLANTATION AREAS."

ABSTRACT The advancement of embedded technologies in remote sensing has expanded the possibilities for various characteristics of sugarcane fields. Thus, this study proposes to evaluate productivity indicators of sugarcane, using spectral indicators from seven varieties, at two planting times. The experimental area is located in the municipality of Barrinha, SP, Brazil, with two summer plantings conducted on November 25, 2021, and an 18-month planting on February 25, 2022, both following a randomized block design. The sugarcane field was monitored throughout the entire in situ cycle through biometric assessments, chlorophyll, and leaf area indices, as well as aerial flights using a Remotely Piloted Aircraft (RPA) equipped with a multispectral camera. An automatic weather station, located in the central area of the experiment, recorded the climatic conditions throughout the experiment. Moments preceding the mechanized harvest with load cell on the transfer, soil samples and sugarcane stalks were taken for technological analysis. Different values of tons of cane per hectare (TCH), total recoverable sugar (TRS), and tons of sugar per hectare (TAH) were found among varieties and planting seasons. Two-summer-planted sugarcane showed higher productivity in TCH, with significant relationships between the normalized difference vegetation index (NDVI) and more evenly distributed productivities throughout the cycle. On the other hand, the 18-month planted sugarcane had significant correlations with TCH and TRS in moments preceding harvest. Through linear regression models to capture productivity indicators, precision metrics ranging from 20 to 62% were observed, with accuracy errors between 2.59 (TAH) and 22.76 (TCH). The red band was the most suitable for estimating productivity with a precision of 0.62. Thus, enhanced insights into planting seasons, cane field behavior, and the strategic use of spectral bands aiming at productivities can be considered in the construction of high-performance sugarcane planning.

Keywords: remote sensing, atmosphere-soil-plant relationships, mathematical modeling.

3.1 Introdução

A principal fonte de produção de açúcar e de bioenergia no mundo vem da cana-de-açúcar, e o Brasil tem posição de destaque tanto na produção como na comercialização destes derivados (Da Silva et al., 2023). Contudo, muitos dos desafios da produção desta cultura vem de fatores abióticos, não controlados, e técnicas de manejo adotadas em campo.

Para a modalidade de plantio intitulada de dois verões, ou de 20 meses, o plantio acontece entre novembro e dezembro, e a colheita entre 20 meses após o plantio, entre abril e julho. Já para as canas de plantio de 18 meses, as canas são plantadas entre janeiro e março, passam por um verão, e são colhidas entre abril e junho do ano seguinte, ou seja, ficam entre 18 meses em campo.

Estas épocas de plantio ficam à deriva dos processos abióticos para o desenvolvimento do canavial (Silvestre et al., 2019). Sabe-se que cana plantadas em momento que antecede o período chuvoso irão conviver com condições térmicas e hídricas, tão importantes ao canavial, bem diferentes das canas plantadas com posterior vinda de época de seca e fria (Resende et al., 2013b).

Desta forma, destaca-se que alguns elementos climáticos, tais como precipitação, temperatura média do ar e radiação solar, são essenciais para o pleno desenvolvimento e para as exigências do cultivo, e que mudando as épocas de plantio, os estádios fenológicos da cana-de-açúcar podem ter ou não as condições ideais, e culminar em produtividades diferentes (Meneses et al., 2016; Holanda, 2010). Somado as condições climáticas, tem a questão dos diferentes materiais genéticos que estão no canavial, que por ser condicionados ao clima, são cuidadosamente planejadas para cada situação edafoclimática para resultar na melhor performance do canavial.

De forma geral, os canaviais hoje, do centro-sul do Brasil, produzem energia limpa, com produção autossustentável em toda sua cadeia, desde uso de bagaço alimentando caldeiras para gerar energia, como reaproveitamento de resíduos orgânicos como o composto, e líquidos ricos em elementos nutricionais como a vinhaça que retornam a campo (Pedroso et al., 2018). Mas, além disto, o sistema canavieiro fomenta novas pesquisas com uso maciço de tecnologia adaptadas para a realidade do campo, destacando, atualmente, o uso de Aeronave Remotamente

Pilotada (ARP) para fins de monitoramento do canavial para investigação de falhas, topografia, imagens de reboleiras, reconhecimento de pragas, entre outras atividades.

Apesar dos esforços das leituras biométricas em campo para acompanhar ou prever as produtividades, muitas áreas ainda ficam sem ser avaliadas, e seu diagnóstico fica incompleto. Com o uso de ARP com sensores acoplados, tais como câmeras multiespectrais, consegue ampliar o diagnóstico, além de contemplar com as vantagens de ser uma técnica de aquisição rápida, não invasiva, e não agressiva ao ambiente (Mulianga et al., 2015). E uma das principais variáveis usadas é pelo índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).

Esses índices variam de -1 a 1, de maneira que, quanto mais próximo de 1, maior é a indicação de um canavial saudável; assim como, quanto mais homogênea a área representada pelo índice NDVI, maior a representação de uma área que não sofreu danos (Ferreira et al., 2022).

Algumas “startups” e empresas do setor agrícola usam os índices de NDVI para o gerenciamento do canavial, sobretudo para observar as anomalias causadas nos talhões que foram observados pelos índices de NDVI (Hemav Technology, 2020), apesar de não incluir outras variáveis como épocas de plantio. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é monitorar o desenvolvimento conjunto de sete variedades de cana-de-açúcar em duas épocas de plantio, avaliando biometria, colheita mecanizada e análise tecnológica, para tanto correlacionar e ajustar modelos com uso de regressões lineares de informações coletadas de câmeras com sensores multiespectrais acoplados em ARP.

3.2. Material e Métodos

3.2.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada a noroeste do estado do estado de São Paulo (SP), em área experimental dos limites de municípios entre Barrinha e Pradópolis (SP), sob coordenadas geográficas a 21°11'38" de latitude sul e 48°09'50" de longitude oeste. Segundo a classificação de Köppen, o clima é classificado como do tipo megatérmico, tropical com estação seca de inverno (Aw), chuvas concentradas no período de novembro a fevereiro e normal climatológica de precipitação a 1400 mm (Thorntwaite, 1948). Esta área está inserida na província geomorfológica do Planalto

Ocidental Paulista, próxima ao limite das Cuestas Basálticas no divisor litoestratigráfico arenito-basáltico, sob formação do Basalto Serra Geral.

Levamento mais atualizado da área, realizado pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), classifica o solo como Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf.1B) textura argilosa, saturação por bases menor que 50%, teores entre 180 a 360 g kg⁻¹ de Fe₂O₃ (pelo H₂SO₄) nos primeiros 100 cm de profundidade do horizonte B, sob cultivo de cana-de-açúcar com colheita mecanizada há mais de 20 anos (Santos et al., 2018).

3.2.2 Área experimental

A área experimental foi submetida a uma análise amostral do solo anterior ao plantio tendo sido recomendado 3,0 toneladas de calcário por hectare, abstendo-se da necessidade de aplicação de gesso agrícola. As etapas que antecedem o plantio foram eliminação de canas remanescentes, seguido da calagem em área total, subsolagem e sulcação apenas na linha de plantio.

Dois experimentos foram instalados em campo, variando apenas a data de plantio, um aos 25 de novembro de 2021, no qual buscou classificar como plantio de dois verões, e outro plantio em 25 de fevereiro de 2022, buscando classificar como plantio de 18 meses. As variedades de cana-de-açúcar plantadas têm atualmente destaque no mercado sucroenergético devido ao alto potencial produtivo.

Estas variedades vêm de diferentes instituições de pesquisas, e apresentam diferentes épocas de maturação, sendo recomendados a vários ambientes de produção. Algumas foram recém-lançadas no mercado, como a IACCTC07-7207, e outras, já estão consolidadas, como a variedade RB855156. As demais variedades escolhidas foram RB985476, CTC4, CTC9006, RB005014 e CTC2994.

As sete variedades foram distribuídas em parcelas de cinco linhas de plantio, espaçadas a 1,5 m entre si com comprimento de 10 metros, totalizando 210 linhas ao todo. Para cada época de plantio foi delineado um experimento em blocos casualizados, sendo três blocos de sete parcelas por bloco casualizados tanto para o plantio de dois verões quanto para o plantio de 18 meses, totalizando assim, seis blocos e 42 parcelas totais (Figura 1).

Para evitar efeito deletério das bordaduras nas avaliações das parcelas do experimento, foi considerado como área útil as mudas centrais da terceira linha de plantio da parcela. Além de considerar duas linhas como bordadura na parte superior e na parte inferior do experimento que servem como proteção para o experimento.

O plantio foi realizado com mudas pré-brotadas usando uma matraca com guia, onde cada muda era plantada a cada 65 cm entre si. Destaca-se que todas as mudas sofreram o mesmo tratamento antes de chegar em campo, com boas condições de raízes, e datas próximas da expedição da biofábrica.

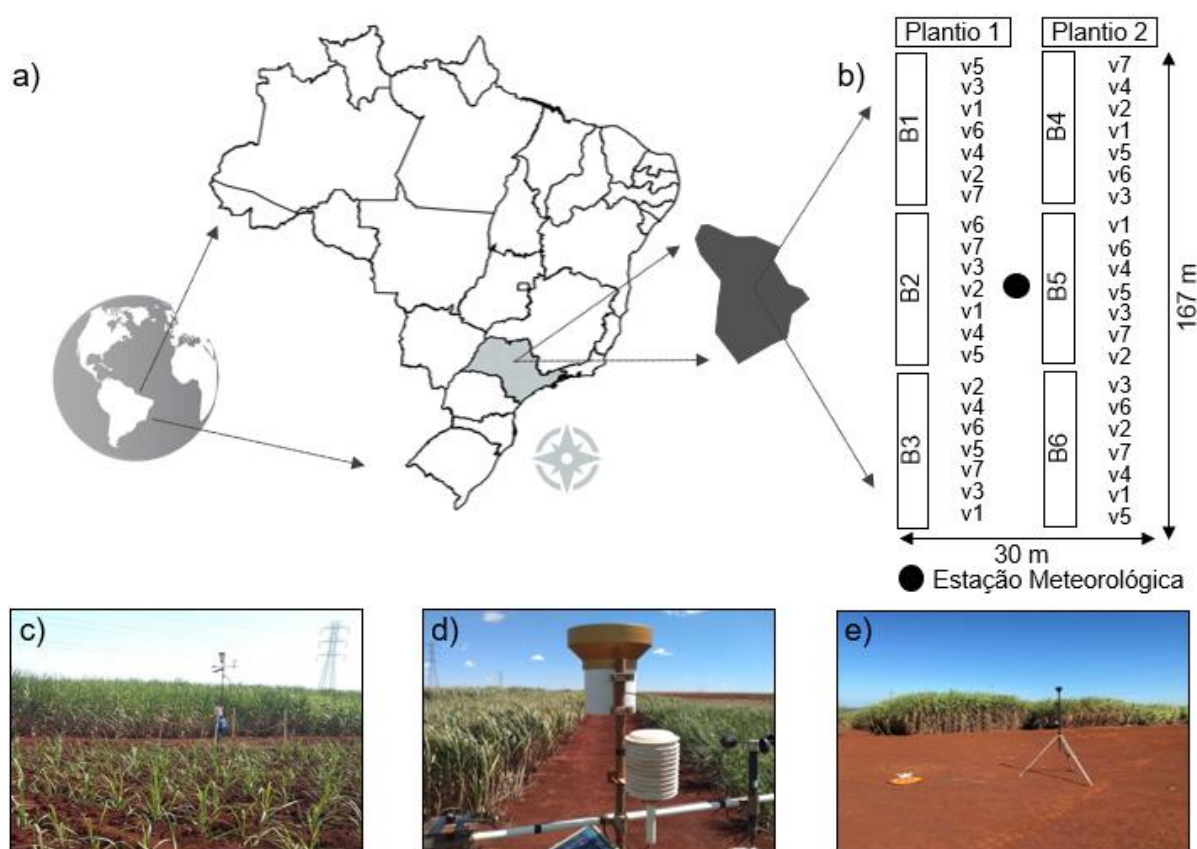


Figura 1. Localização da área de estudo: a – município de Barrinha (SP); b – delineamento experimental para o plantio 1 realizado em 25 de novembro de 2021 e Plantio 2 realizado em 25 de fevereiro de 2022; c – vista lateral do experimento aos 149 dap novembro (atrás) e 57 dap fevereiro (à frente); d - estação meteorológica e vista frontal da área aos 344 dap novembro (esquerda) e 252 dap fevereiro (direita); e – RPA no solo e a base RTK para voo realizado aos 578 dap novembro (direita) e 486 dap fevereiro (esquerda). dap: dias após o plantio.

Na parte central do blocos, entre os blocos dois e cinco, uma estação meteorológica experimental foi instalada visando mensurar os principais elementos climáticos durante este período de avaliação (Figura 1b). A varredura destes dados está a cada 60 segundos, disponibilizando a cada 20 minutos a média ou acumulados em um sistema de servidor com o emprego de um modem 3G.

A estação meteorológica fornece as seguintes leituras: temperatura média do ar (°C) e umidade relativa do ar (%) a 80 cm do solo, temperatura média do ar (°C), umidade relativa do ar (%), radiação solar global ($W m^{-2}$), velocidade do vento ($m s^{-1}$) e precipitação pluvial (mm) a 300 cm do solo, e dados de temperatura média (°C) e umidade do solo (Ω) a 10, 20 e 150 cm de profundidade do solo.

3.2.3 Avaliações aferidas em campo

Leituras biométricas foram iniciadas aos 15 dias após o plantio de cada época, e depois realizadas aos 30, 60, 90 até o múltiplo de 30 anterior ao momento de colheita, totalizando 20 leituras biométricas para acompanhar o crescimento de plantio de dois verões e 17 leituras para acompanhar o crescimento do plantio de 18 meses.

As leituras eram realizadas nas partes centrais da terceira linha de cada parcela, onde colocou uma fita larga em 5 colmos representativos da parcela, evitando o estrangulamento, assim que tivesse entrenós. Ao todo foram 110 colmos mensurados em cada leitura biométrica do plantio de dois verões e 110 colmos do plantio de 18 meses.

Equipes divididas no local iniciavam leituras do número de perfilhos, número de entrenós visíveis, e número de folhas não senescentes. Utilizando um paquímetro digital de 4 dígitos foram realizadas medições do diâmetro médio da parte basal, média e superior do colmo, e da largura da folha +1. Com o uso de uma trena de 3 metros foram medidos o comprimento dos entrenós visíveis na parte basal, médio e superior,

Com uma régua graduada adaptada a um mastro de madeira, foi mensurado a altura do colmo da parte do solo até a folha +1, totalizando cinco leituras por parcela. Ao todo, apenas para altura, 2100 leituras foram obtidas para acompanhar o plantio de dois verões e 1785 leituras para acompanhar o plantio de 18 meses.

Aos 120 dias após o plantio de cada época, iniciou a leitura do índice relativo de clorofila (IRC) nas folhas +1 com o emprego de um clorofilômetro, ClorofiLOG, modelo Falker CF L1030. E com o uso do sensor AccuPAR LP 80, também iniciado aos 120 dias após o plantio, foram medidos a radiação fotossinteticamente ativa (PAR), com medições na terceira linha no centro da parcela, acima do dossel e a 0,10 metros acima da superfície do solo, para acompanhar as leituras do índice de área foliar (IAF).

Imagens multispectrais foram capturadas desde o momento do plantio até momento antes da colheita, obedecendo intervalos próximos às leituras biométricas. Estas avaliações foram possíveis devido o uso de uma plataforma com sistema de aeronave remotamente pilotada (RPA), multirrotor (DJI Phantom 4 Multispectral RTK, Shenzhen, China).

A ARP possui câmera multiespectral de seis sensores monocromáticos, incluindo um sensor RGB, e cinco sensores para imagens multiespectrais: Blue ($450 \pm 16\text{nm}$), Green ($560 \pm 16\text{nm}$), Red ($650 \pm 16\text{nm}$), RedEdge ($730 \pm 16\text{nm}$) e NIR ($840 \pm 26\text{nm}$), além de possuir sensor de luz solar na parte superior da aeronave para compensar a radiação solar incidente durante o voo e garantir que os dados espectrais sejam consistentes.

A aeronave também possui receptor de sistema global de navegação por satélite (GNSS) multifrequência com correção em tempo real (RTK) (DJI D-RTK2 base station, Shenzhen, China), capaz de receber sinais de constelações nomeadamente GPS, GLONASS, BeiDou e Galileo, garantindo precisão posicional centimétrica, tornando possível adquirir dados temporais do mesmo ponto.

Os voos eram realizados entre as 12 horas, com condições favoráveis de vento e luz. A duração dos voos eram, em média, de 10 minutos, e foram programados automaticamente pelo aplicativo ((DJI GS Pro, Shenzhen, China). As configurações e parâmetros definidos foram: altura a 50 metros, velocidade a $12,4 \text{ km h}^{-1}$, uma foto a cada dois segundos, distância de amostra do solo (GSD) de $2,6 \text{ cm/pixel}$, sobreposição frontal de 80% e lateral de 70%.

As imagens capturadas foram processadas para construção de ortomosaicos multiespectrais por software de processamento fotogramétrico (Agisoft Metashape Professional 1.5.5, Agisoft, St. Petersburg, Russian). O conjunto de imagens de cada

dia de voo foi processado individualmente, extraindo-se as informações espectrais de cada ortomosaico, onde se pode calcular o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em linguagem R (versão 4.1.0), pelo pacote open-source “FIELDimageR” (Matias et al., 2020).

Dias que antecederam a colheita foram retiradas três amostras de solo por parcela, totalizando 126 amostras, na profundidade de 0,00 - 0,20 metros e encaminhadas para análise em laboratório para verificação da argila (%), silte (%), areia total (%), matéria orgânica (g dm^{-3}), pH em CaCl_2 , fósforo em resina (mg dm^{-3}), $\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$ ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), potássio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), cálcio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), magnésio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), sulfato (mg dm^{-3}), cobre (ppm), manganês (ppm) e ferro (ppm) (Teixeira et al., 2017). Procedeu-se o cálculo da saturação por bases (V%) à partir da capacidade de troca catiônica (CTC) e soma de bases (SB) de acordo com proposto por Raij et al (2001)

Para a análise tecnológica, a fim de se obter o indicador ATR (açúcar total recuperável), foram retirados 30 colmos por parcela para formar três avaliações de pré-análise (10 colmos por amostra). As avaliações destes colmo seguiram para análise em laboratório e obedeceram aos critérios propostos pelo Conselho dos Produtores de cana-de-açúcar, açúcar e álcool do estado de São Paulo (Consecana, 2006).

No momento da colheita usou colhedora mecanizada com transbordo adaptado com célula de carga, onde os pesos aferidos foram extrapolados para toneladas de cana-de-açúcar por hectare (t ha^{-1}) (TCH).

3.2.4 Análise dos dados

Os dados coletados da biometria, índice relativo de clorofila, índice de área foliar foram acompanhados de gráficos de dispersão com a média e desvio padrão ao longo das épocas de amostragem. Os dados da estação foram aferidos para o cálculo de balanço hídrico climatalógico proposto por Thornthwaite e Mather (1955), para um solo com capacidade de armazenamento do solo de 100 mm. Estes balanço foi adaptado para a linguagem em Python com as funções de pandas, numpy, matplotlib.pyplot, seaborn e datetime (Chen, 2018).

As análises físicas e químicas do solo, dos valores do TCH e ATR foram submetidas as pressuposições básicas das análises de variância, normalidade dos erros e da homogeneidade das variâncias. Verificado estas pressuposições, usou-se a comparação das médias pelo teste de LSD (Least Significant Difference), ao nível de 5% de probabilidade, para diferenciar as médias dos tratamentos nas duas épocas de plantio. Estas análises estatísticas foram possíveis devido ao uso do software estatístico R Core Team (2022), incluindo-se as bibliotecas readxl, corrplot, nortest, easyanova e ExpDes.p (Ferreira et al., 2018).

Diante os valores de TCH e ATR foi calculado a tonelada de pol por hectare (TPH) de acordo com a equação 1:

$$TPH = \frac{TCH \times ATR}{1000} \dots\dots\dots \text{equação 1}$$

Para as variáveis relacionadas à produtividade (TCH, ATR e TPH) foi verificado análise conjunta das duas épocas de plantio, visando conclusões mais abrangentes dos experimentos. Esta análise foi possível devido aos quadrados médios residuais não ultrapassarem a relação de 7:1 (Banzato e Kronka, 1989).

Os dados de NDVI (equação 2) ao longo das leituras foram correlacionados aos dados de produtividade final (TCH, ATR e TPH), de acordo com a correlação de Pearson (equação 3).

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \dots\dots\dots \text{equação 2}$$

$$r = \frac{(N \sum_{i=1}^N (X_{obs_i} Y_{obs_i}) - \sum_{i=1}^N X_{obs_i} \sum_{i=1}^N Y_{obs_i} ((N \sum_{i=1}^N Y_{obs_i})^2 - (\sum_{i=1}^N Y_{obs_i})^2))}{\sqrt{((N \sum_{i=1}^N X_{obs_i})^2 - (\sum_{i=1}^N X_{obs_i})^2)}} \dots\dots\dots \text{equação 3}$$

N = número de dados; Xobsi = valores observados de X; Yobsi = valores observados de Y.

Buscou-se correlacionar as bandas espectrais (R, G, B, RedEdge ou NIR) com indicadores de produtividade. A banda que obteve a maior correlação era modelada por meio de regressão linear visando captar o indicador de produtividade por uma equação, obedecendo ordem de grandeza mais apropriada para obter o melhor desempenho. O indicador de desempenho de acurácia do modelo usado foi a raiz do erro quadrático médio (RMSE), de acordo com a equação 4:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_{OBS_i} - Y_{EST_i})^2}{N}} \dots\dots\dots \text{equação 4}$$

As bibliotecas usadas em linguagem Python foram o “sklearn” para obter a RMSE, e o “statsmodels” para obter as funções de regressões.

3.3 Resultados e Discussão

Os valores relacionados ao clima por meio de chuvas e déficit hídrico acumulados, assim como os valores mensais do balanço hídrico podem ser encontrados na Figura 1. Para a situação de plantio de dois verões foi registrado acumulados de 2293 mm, chegando aos 800 mm após os 150 dias após o plantio. Para o plantio de 18 meses foram registrados acumulados de 1740 mm, com pouca chuva nos períodos iniciais após o plantio, chegando aos 800 mm após os 300 dias após o plantio.

As fases iniciais de perfilhamento da cana-de-açúcar são muito dependentes de água de solo, pois é um período crítico para a crescimento das raízes, altura dos colmos, e número de entrenós (Zhao e Li, 2015). Comparando a condição pluviométrica, observa-se maiores acumulados d’água para a cana de plantio de dois verões.

O acumulado de déficit hídrico para o plantio de dois verões foi de 601 mm, enquanto que no plantio de 18 meses foi de 614 mm. A pequena diferença no acumulado de déficit hídrico entre essas épocas de plantio pode sugerir condições semelhantes para o desenvolvimento do canavial. No entanto, isso seria um equívoco, uma vez que no plantio de 18 meses houve déficits hídricos nos primeiros meses do plantio (Figura 1c), situação não observada para o plantio de dois verões (Figura 1b).

No entanto, quando se observa as Figuras 1a) e 1b) , entre março e setembro de 2022, foram período de déficit hídrico para ambas as situações. Neste período de déficit hídrico a cana que foi plantada em 25 de novembro de 2021 (plantio de dois verões) estava com 120 dias após o plantio, ao contrário das canas que foram plantadas em 25 de fevereiro de 2022 (plantio de 18 meses), que em março de 2022 estavam com seus 30 dias após o plantio.

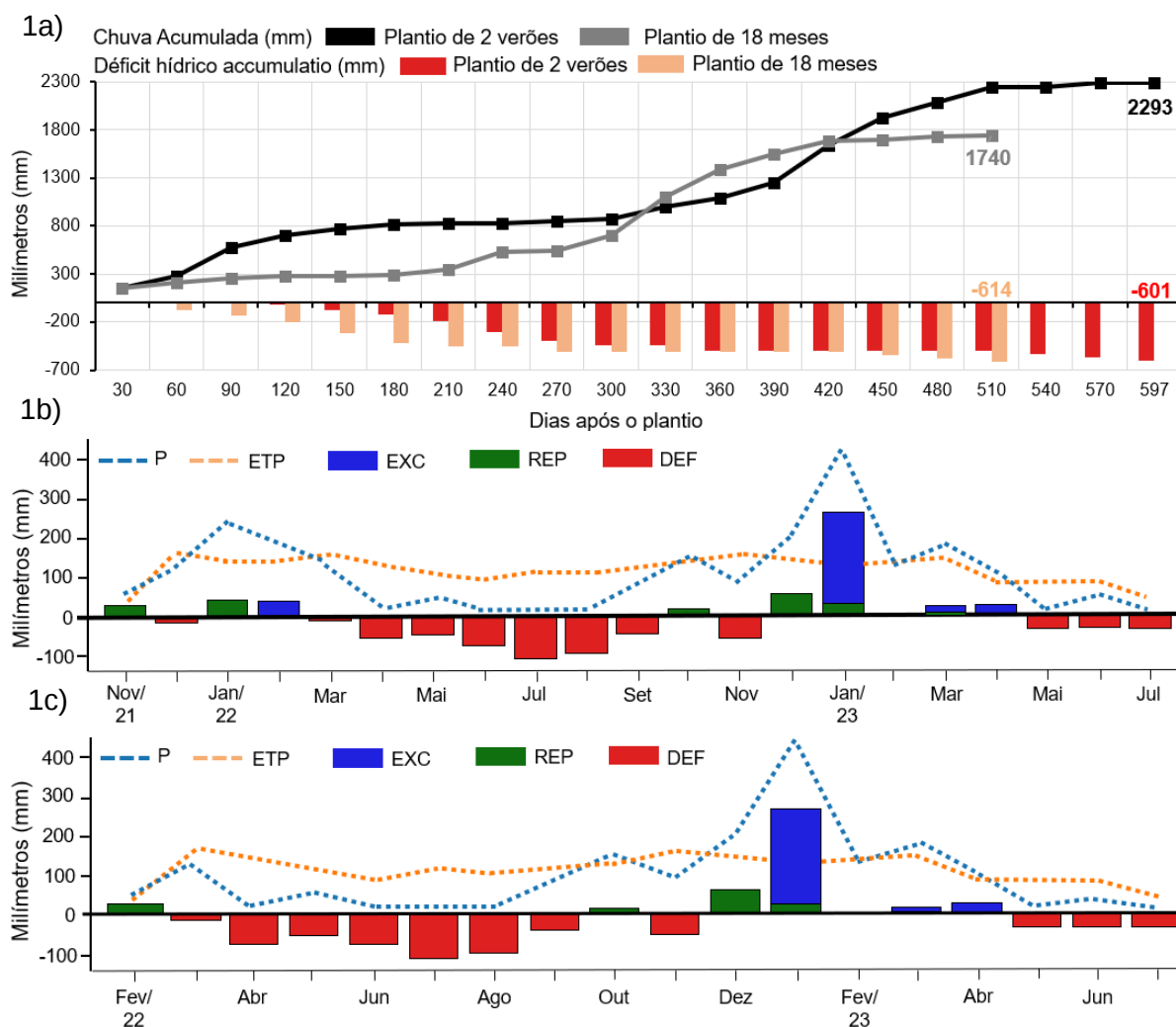


Figura 1. Ilustração dos dados climatológicos das áreas de plantio seguidos do extrato do balanço hídrico climatológico sequencial (BH). 1a) Chuva acumulada (precipitação e irrigação de pegamento) e déficit hídrico acumulativo (mm) após o plantio de dois verões e 18 meses; 1b) BH do plantio realizado em novembro (dois verões); 1c) BH do plantio realizado em Fevereiro (18 meses). P: precipitação; ETP: evapotranspiração; EXC: excedente hídrico (mm); REP: reposição (mm); DEF: déficit hídrico (mm).

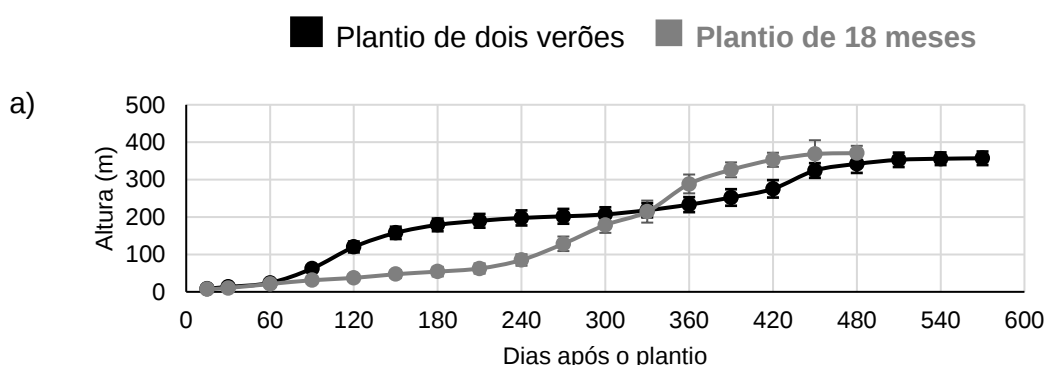
A situação das canas estarem em estádios fenológicos diferentes para enfrentar o período do inverno, frio e seco, pode ser fundamental para entender as leituras biométricas em campo (Gráfico 1). As canas de dois verões chegaram ao inverno com maior número de folhas, com maior número de entrenós, alturas mais elevadas e soqueiras com mais perfilhos, e isto pode penalizar ou dificultar a situação do desenvolvimento devido serem mais exigentes em termos de água no solo.

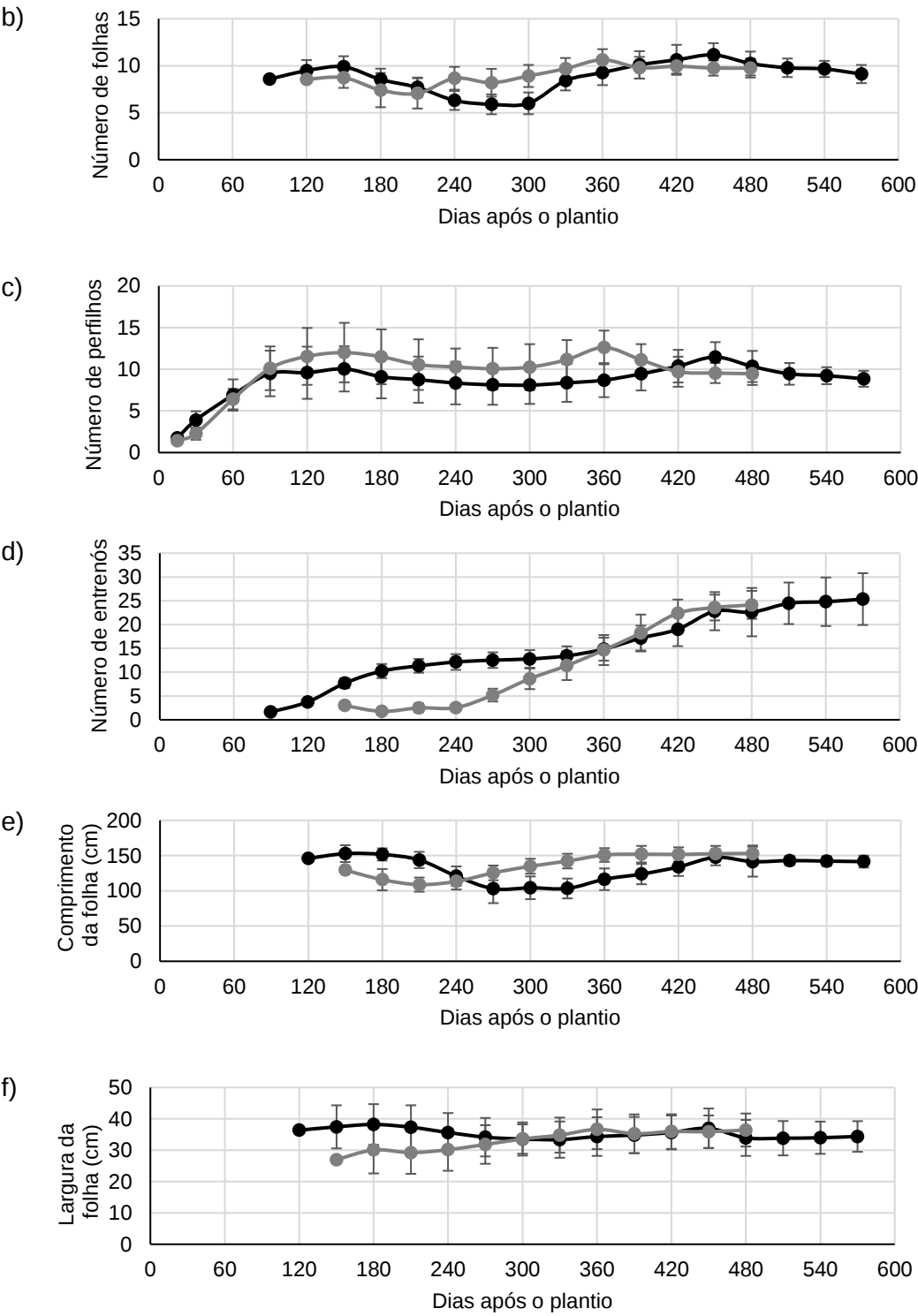
Canas de menor altura, de menor área foliar, podem propiciar condições menos favoráveis para evapotranspirar em relação as canas mais desenvolvidas. Isto pode ser determinante para combater situações estressantes causado pelo adversidade climática de baixas temperaturas médias do ar, baixas radiação solar e poucos acumulados de água.

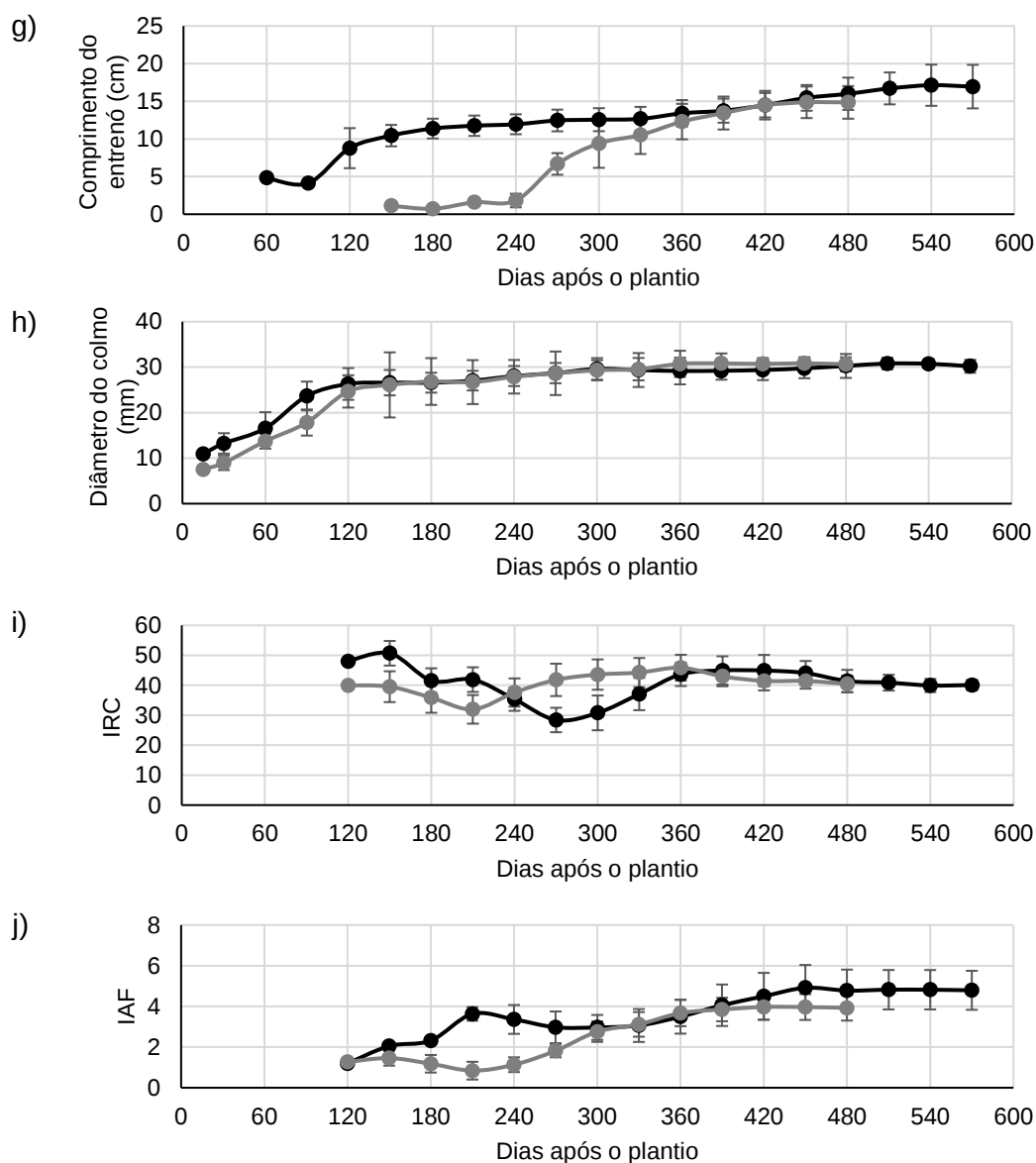
As médias, seguidas pelo desvio padrão, para as variáveis biométricas, do índice relativo de clorofila (IRC) e índice de área foliar (IAF) podem ser ilustrados no Gráfico 1. Até os 300 dias após o plantio em cada situação, o comportamento da altura (Gráfico 1a), número de entrenós (Gráfico 1d), comprimento de entrenós (Gráfico 1g) e índice de área foliar (IAF) (Gráfico 1j) são maiores no plantio de dois verões em relação ao plantio de 18 meses.

O plantio de 25 de fevereiro de 2022 (cana de 18 meses) encontrou no verão de 2022 o melhor período para o crescimento da altura (Gráfico 1a). Neste mesmo período, já era o segundo verão para a cana plantada em 25 de novembro de 2021, e nelas passou a crescer novos brotos, como dando chances de propiciar novo pico de perfilhamento (Gráfico 1c). No entanto, independente da variáveis dos gráfico 1, todas terminaram com média e desvios muito próximos entre si para as duas épocas de plantio estudadas.

Gráfico 1. Avaliações da média seguida do desvio padrão das leituras biométricas (altura (cm), número de folhas, número de perfilhos, número de entrenós, comprimento da folha (cm), largura da folha (mm), comprimento do entrenó (cm), diâmetro do colmo (mm), índice relativo de clorofila (IRC) e do índice de área foliar (IAF)).







Aos 300 dias após o plantio das canas plantadas em 25 de fevereiro de 2022 (plantio de 18 meses) já era final de dezembro de 2022, onde o retorno das chuvas, maiores médias de temperatura e radiação solar, favoreceram o desenvolvimento da cana. Com fatores bióticos favoráveis, observa-se influência mais nítida no rápido crescimento de algumas variáveis, como mostrado no comportamento do número de folhas, (Gráfico 1b) e comprimento da folha (Gráfico 1e).

Para o plantio de dois verões verificou-se uma queda gradual do número de folhas (Gráfico 1b), comprimento da folha (Gráfico 1e) e do índice relativo de clorofila (IRC) (Gráfico 1i), e esta queda pode ter relações ao fato das soqueiras apresentarem,

no momento deste período elevados déficit hídricos, entrenós visíveis, altura maior e mais número de entrenós.

Assim como as situações do clima e fatores biométricos foram observados ao longo dos dias após o plantio, também foi mensurado na etapa final do ciclo, em momentos que antecederam a colheita, os atributos físicos e químicos do solo (Tabela 1).

Tabela 1. Avaliação dos atributos físicos e químicos do solo na profundidade de 0,00 – 0,20m em momento anterior a colheita mecanizada.

Plantio de dois verões						
Média	Argila (%)	Silte (%)	AT (%)	MO (g kg ⁻¹)	pH CaCl ₂	P (resina)
2994	49,71 d	34,82 a	15,47 a	31,74 a	5,97 b	27,99 b
CTC4	54,37 b	30,88 bc	14,75 ab	32,38 a	5,37 c	17,83 d
9006	54,13 b	30,75 bc	15,12 a	29,50 a	5,97 b	23,78 bc
7207	53,45 bc	31,71 abc	14,84 ab	31,19 a	5,45 c	23,98 bc
5014	51,19 cd	33,72 ab	15,09 a	31,46 a	6,47 a	34,99 a
5156	55,19 b	29,76 cd	15,05 a	29,77 a	5,53 c	22,27 cd
5476	58,70 a	27,22 d	14,08 b	29,79 a	5,33 c	21,90 cd
Média	H + Al	K (resina)	Ca	Mg	SO ₄ ²⁻	SB
2994	2,37 de	0,24 a	5,23 a	2,29 a	13,05 c	7,76 a
CTC4	3,77 ab	0,17 abc	2,95 c	1,47 d	34,93 a	4,60 c
9006	2,91 cd	0,17 abc	3,82 b	1,91 bc	24,33 b	5,90 b
7207	3,27 abc	0,12 bc	3,54 bc	1,74 cd	21,26 b	5,40 bc
5014	1,73 e	0,10 c	5,06 a	2,25 ab	9,99 c	7,42 a
5156	3,18 bc	0,19 ab	3,96 b	1,72 cd	25,46 b	5,60 b
5476	3,90 a	0,13 bc	3,49 bc	1,63 cd	9,32 c	5,24 bc
Média	CTC	V%	Cu (ppm)	Fe (ppm)	Mn	Zn (ppm)
2994	10,14 a	76,79 a	5,58 a	3,87 d	26,97 a	1,68 a
CTC4	8,37 c	53,69 d	4,87 bc	5,82 ab	18,96 b	0,79 bc
9006	8,81 bc	66,72 b	5,16 ab	4,72 bc	19,50 b	0,73 c
7207	8,66 bc	67,49 b	5,35 a	5,88 ab	20,26 b	1,14 b
5014	9,15 b	81,03 a	4,52 c	4,71 c	20,14 b	0,78 bc
5156	8,76 bc	63,30 bc	5,49 a	6,79 a	26,36 a	0,76 bc
5476	9,14 b	57,44 cd	5,32 a	5,89 abc	23,83 ab	0,74 c
Plantio de 18 meses						
Média	Argila (%)	Silte (%)	AT (%)	MO (g kg ⁻¹)	pH CaCl ₂	P (resina)
2994	57,84 a	28,92 cd	13,24 c	30,92 bcd	5,89 a	30,34 ab
CTC4	53,11 c	32,72 a	14,17 ab	30,71 cd	5,58 bc	22,51 c
9006	54,17 c	31,57 abc	14,27 ab	32,39 bc	5,67 abc	26,97 abc
7207	53,06 c	32,21 ab	14,74 a	32,94 ab	5,50 cd	23,08 c
5014	57,61 ab	28,03 d	14,36 ab	30,02 d	5,79 ab	24,58 c
5156	55,30 bc	29,76	14,94 a	35,13 a	5,79 ab	25,64 bc
5476	56,96 ab	29,49 bcd	13,55 bc	30,21 cd	5,28 d	31,59 a
Média	H + Al	K (resina)	Ca	Mg	SO ₄ ²⁻	SB

2994	2,63 bc	0,16 ab	4,23 a	2,19 a	17,00 ab	6,58 a
CTC4	2,80 abc	0,14 ab	3,89 a	1,99 abc	14,81 ab	6,03 a
9006	2,99 abc	0,13 ab	4,20 a	2,03 abc	14,23 b	6,36 a
7207	3,24 ab	0,12 b	4,01 a	1,78 c	17,63 ab	5,91 ab
5014	2,52 c	0,12 b	3,92 a	1,87 bc	21,77 ab	5,90 ab
5156	2,90 abc	0,16 ab	4,28 a	2,16 ab	19,78 ab	6,61 a
5476	3,35 a	0,16 ab	3,87 a	1,44 d	28,66 a	5,47 b
Média	CTC	V%	Cu (ppm)	Fe (ppm)	Mn	Zn (ppm)
2994	9,21 ab	71,49 a	5,23 b	5,00 bc	22,52 b	0,86 b
CTC4	8,83 abc	68,28 a	4,96 bc	4,88 bc	19,88 bc	0,82 b
9006	9,35 ab	68,27 a	5,09 bc	5,42 b	22,47 b	0,77 b
7207	9,15 ab	64,65 ab	5,43 b	4,88 bc	23,56 b	0,95 b
5014	8,42 c	68,95 a	4,70 c	4,56 c	17,36 c	1,12 b
5156	9,50 a	69,47 a	6,75 a	6,59 a	28,90 a	2,91 a
5476	8,82 bc	59,76 b	5,40 b	5,07 bc	23,87 b	0,87 b

Variedades: 2994, CTC2994; 9006, CTC9006; 7207, IACCTC07-7207; 5014, RB005014; 5156, RB855156; 5476, RB985476. Valores médios com a mesma letra não diferem entre si, pelo teste LSD, ao nível de 5% de probabilidade. AT, Areia Total (%); MO, matéria orgânica (g dm⁻³); P, fósforo (mg dm⁻³); H+Al, sauração por alumínio (cmol_c dm⁻³); K, potássio (cmol_c dm⁻³); Ca, cálcio (cmol_c dm⁻³); Mg, magnésio (cmol_c dm⁻³); SO₄²⁻, sulfato (mg dm⁻³); S, soma de bases (%); CTC, capacidade de troca catiônica (cmol_c dm⁻³); V%, saturação por bases; Cu, cobre (ppm); Fe, ferro (ppm); Mn, manganês (ppm); Zn, zinco (ppm).

Sabe-se que o solo em estudo é classificado como Latossolo Vermelho distroférico, textura argilosa, permitindo variações aceitáveis de argila de 36 a 60% (Prado, 2005). E os valores encontrados de argila no presente estudo variou de 49,71%, observado na parcela onde estava alocado a variedade CTC2994 no plantio de dois verões, até 58,70%, na variedade RB985476 também na situação de plantio de dois verões (Tabela 1).

A argila é muito importante para o armazenamento de água no solo e para a para a dinâmica de nutrientes do sistema solo-planta-atmosfera. Quanto mais argila, em solo bem aerado e nutrido, espera-se melhor condição para produtividade.

Como esperado, observa-se na Tabela 1 que os maiores valores de argila, seguiram os menores valores de silte e areia total. Para o plantio de dois verões, todas variáveis do solo foram diferentes entre as variedades, com exceção para matéria orgânica. Para o plantio de 18 meses apenas o cálcio não se diferenciou entre as variedades.

O fato de encontrar mais matéria orgânica nas parcelas do experimento para a época de plantio de 18 meses na variedade RB855156 também pode ser um fator importante para compreensão dos índices de produtividade (Tabela 2). Isto porque a

matéria orgânica, além de fornecer nutrientes a longo prazo de forma gradual quando comparado a produtos sintéticos, também ajuda na melhora do solo por meio de ácidos húmicos, o que favorece condições que mantêm a biodiversidade biológica do solo.

Tabela 2. Desdobramento da interação entre as variedades de cana-de-açúcar para TCH, ATR e TAH para cada época de plantio (1.a e 1.b), para a média das variedades nas duas épocas (1.c), e para a média geral entre as épocas de plantio (1.d).

1.a Plantio de dois verões		TCH		ATR		TAH	
Variedade	Média	EPM	Média	EPM	Média	EPM	
2994	183,34 b	17,1	139,38 bc	1,80	25,49 b	2,08	
CTC4	200,00 ab	5,09	133,55 bc	6,07	26,65 ab	0,59	
9006	212,22 ab	15,4	128,95 c	5,15	27,22 ab	1,09	
7207	231,11 a	2,94	141,04 bc	0,44	32,60 a	0,50	
5014	174,44 b	16,0	139,89 bc	5,51	24,28 b	1,78	
5156	173,33 b	15,0	157,25 a	1,48	27,26 ab	2,41	
5476	197,78 ab	21,4	142,81 b	7,25	28,31 ab	3,73	
1.b Plantio de 18 meses		TCH		ATR		TAH	
Variedade	Média	EPM	Média	EPM	Média	EPM	
2994	171,11 bc	10,9	147,61 bc	2,24	25,86 ab	1,87	
CTC4	161,11 bc	4,44	138,30 de	1,24	22,29 b	0,72	
9006	222,23 a	27,1	135,64 e	3,01	30,05 a	3,30	
7207	210,00 a	11,7	120,58 f	2,92	25,32 ab	1,48	
5014	153,34 c	15,0	143,40 cd	1,01	21,98 b	2,11	
5156	168,89 bc	8,89	151,76 a	7,35	25,69 ab	2,21	
5476	191,11 ab	7,78	153,11 ab	1,86	29,27 a	1,39	
1.c Plantio de dois verões e 18		TCH		ATR		TAH	
Variedade	Média	EPM	Média	EPM	Média	EPM	
2994	177,22 bc	9,48	143,49 ab	2,24	25,39 ab	1,25	
CTC4	180,56 bc	9,21	135,93 ab	2,97	24,47 ab	1,06	
9006	217,22 a	14,1	132,29 b	3,06	28,64 a	1,68	
7207	220,56 a	6,57	130,81 b	4,76	28,96 a	4,34	
5014	163,89 c	10,9	141,65 ab	2,62	23,13 b	1,34	
5156	171,11 bc	7,87	154,50 a	3,57	26,47 ab	1,50	
5476	194,44 ab	9,46	147,96 ab	4,06	28,79 a	4,39	
1.d Épocas		TCH		ATR		TAH	
Plantio	Média	EPM	Média	EPM	Média	EPM	
dois verões	196,03 a	6,36	140,41 a	2,35	27,40 a	0,84	
18 meses	182,54 b	6,96	141,49 a	2,58	25,70 a	0,90	

Variedade, 2994, CTC2994; 9006, CTC9006; 7207, IACCTC07-7207; 5014, RB005014; 5156, RB855156; 5476, RB985476. Valores médios com a mesma letra não diferem entre si, pelo teste LSD, ao nível de 5% de probabilidade. EPM, Erro padrão da média ($\pm$); TCH, toneladas de cana por hectare ($t\ ha^{-1}$); ATR, Açúcar total recuperável ($kg\ t^{-1}$); TAH, toneladas de açúcar por hectare ($t\ ha^{-1}$).

O valor de pH a 6,46 para a variedade RB005014 no plantio de dois verões é uma condição desfavorável para a maioria da absorção dos nutrientes, isto porque estudos indicam faixas mais aceitáveis de pH entre 5,7 (Malavolta et al., 2002). Embora não dispondo das avaliações iniciais dos atributos do solo que antecedem o plantio, pode-se entender que estas diferenças físicas e químicas do solo podem interferir nos indicadores de produtividade (Franco et al., 2008).

Se partir do princípio de que todas as parcelas receberam mesma dosagem de calcário, de forma uniforme e bem distribuída, mas que há diferenças nos atributos do solo em momentos que antecedem a colheita, somada as diferenças de exportação de nutrientes de cada variedade, pode-se entender que as produtividades (Tabela 2) podem ser diferentes (Coleti et al., 2006; Moura Filho, 2006; Prado et al., 2002).

Resultados semelhantes de condições nutricionais, envolvendo cana irrigada e cana de sequeiro, mostram que variedades de cana-de-açúcar apresentam extrações diferentes de nutrientes (Barbosa et al., 2002, Oliveira et al., 2002). Outros estudos envolvendo alocação nutricional em cana-de-açúcar, sugerem que a absorção do cálcio é favorecida em solos mais úmidos, e que algumas variedades tais, como RB867515 e RB943365, apresentam maior capacidade de ciclagem de nutrientes (Oliveira et al., 2011).

Em solos com manejo adequados, o teor de nutrientes na planta não muda muito, mas, a produtividade pode mudar e representar o efeito da extração destes nutrientes na planta (Simões Neto et al., 2009). Verifica-se por meio da Tabela 2 que houve diferenças na produtividade, que pode ter sido devido ao efeito da extração destes nutrientes na planta, além das respostas fisiológicas promovido por condições ambientais diferentes que cada época de plantio presenciou durante seu ciclo.

Para a época de plantio de dois verões, uma das variedades mais produtivas foi a IACCTC07-7207, que registrou 231,11 de toneladas de cana por hectare (TCH) e 32,60 de açúcar por hectare (TAH), seguidas de outras variedades produtivas como CTC9006, CTC4 e RB985476 (Tabela 2).

Para a época de plantio de 18 meses, todas as variedades foram similares em respostas produtivas em termos de TAH, com mais destaques as variedades CTC9006 com 30,05 de TAH, e variedade RB855476, com 29,27 de TAH. No entanto,

a variedade CTC4 e RB005014, ficou entre os menores valores em termos de TAH, respectivamente com 22,29 e 21,98 de TAH (Tabela 2).

Enquanto para análise conjunta, a época de plantio de dois verões foi significativamente 13,49 toneladas por hectare a mais, ou 7,39% maior que o TCH do que a época de plantio de 18 meses. Não foram observadas diferenças significativas entre as épocas de plantio para o ATR e TAH.

Pela Figura 1, observa-se diferenças nas correlações entre NDVI e produtividade quando separadas entre épocas de plantio.

	Plantio de dois verões			Plantio de 18 meses		
dap	TCH x NDVI	ATR x NDVI	TAH x NDVI	TCH x NDVI	ATR x NDVI	TAH x NDVI
30	0,17	-0,16	0,07	0,27	-0,11	0,20
60	0,32*	-0,41*	0,12*	0,32*	-0,09	0,28
90	0,35	-0,36*	0,18	0,25*	-0,11	0,20
120	0,30	-0,37*	0,13	0,21*	-0,05	0,19
150	0,26	0,05	0,31	0,28*	-0,13	0,22
180	0,07	-0,03	0,02	0,37	-0,06	0,36
210	-0,24*	0,21	-0,15*	0,28*	0,12	0,37
240	0,01	0,11	0,10	0,31	0,12	0,40
270	0,10	0,03	0,16	0,16*	0,00	0,15
300	0,26	-0,40*	0,09	0,36	-0,20	0,25
330	0,29	-0,48*	0,07	0,29	-0,47*	0,04*
360	0,19	-0,39*	0,01	0,47	-0,38*	0,28
390	0,02	-0,28*	-0,09	0,68*	-0,46*	0,45
420	-0,10*	0,04	-0,06*	0,52*	-0,55*	0,25
450	-0,18*	0,26*	-0,06*	0,64*	-0,55*	0,38
480	-0,08*	0,03	-0,09*	0,45*	-0,68*	0,10
510	0,09	0,01	0,05	n/a	n/a	n/a
540	0,19	-0,23	0,05	n/a	n/a	n/a
570	0,20	-0,23	0,07	n/a	n/a	n/a

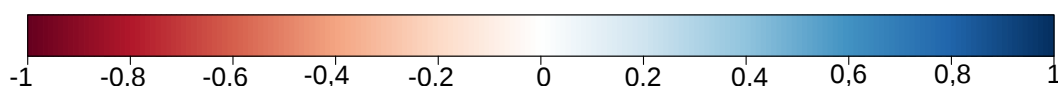


Figura 1, Correlação linear de Pearson entre o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) por dias após o plantio e o valor real de TCH, ATR e TAH no momento da colheita. O intervalo de confiança foi de 95%, o nível de significância adotado foi de ($p < 0,05$), ^{ns} não significativo; dap, dias após o plantio; n/a: não se aplica; TCH: toneladas de cana por hectare ($t\ ha^{-1}$); ATR, Açúcar total recuperável ($kg\ t^{-1}$); TAH: toneladas de açúcar por hectare ($t\ ha^{-1}$).

Diante os valores medidos para o TCH e análises tecnológicas para conversão de valores em ATR, permitindo cálculo do TAH, foi proposto investigar em qual momento as imagens obtidas por câmara multiespectral embarcada em ARP mais capturavam as relações entre NDVI e produtividade.

Não houve correlações significativas entre NDVI e os valores de TCH, ATR e TAH nos últimos 60 dias que antecederam a colheita para o plantio de dois verões, diferente da época de plantio de 18 meses, no qual, momentos antes do período do momento da colheita, registrou-se relação significativa a 0,45 para TCH e -0,68 para ATR (Figura 1).

De forma geral, para ambas as épocas de plantio, o ATR se correlaciona de forma oposta aos valores de NDVI, ou seja, valores mais baixos deste indicador espectral acompanha valores mais altos de ATR. Diferente do ATR, os valores de TCH e TAH, em geral, ficam correlacionados positivamente com os valores de NDVI (Figura 1).

Fato é que a maior correlação entre NDVI e produtividades para a época de plantio de dois verões aconteceu aos 330 dias após o plantio (dap) para o ATR ($r = -0,48$), seguido de maior correlação para o TCH aos 60 dap ($r = 0,32$) e TAH aos 210 dap ($r = -0,15$). Para o plantio de 18 meses, os maiores valores desta correlação foi aos 480 dap para ATR ($r = -0,68$), e aos 390 dap para TCH ($r = 0,68$) e 330 dap para o TAH ($r = 0,04$).

Entretanto, acompanhando os valores de NDVI por variedade ao longo do experimento, e comparando com as épocas de plantio, algumas diferenças ficam mais nítidas (Figura 2 e 3). Períodos após o plantio, com NDVI entre -1 a 0,1 ficam nos primeiros 60 dias após o plantio de novembro, enquanto nos primeiros 90 dias após o plantio de fevereiro.

Para o plantio de dois verões, o rápido crescimento dos valores do NDVI, para quase todas as variedades, aconteceu logo após o verão do final de 2021 e início de 2022, o que corresponde a leituras entre os 90 e 150 dap (Figura 2). Isto vai ao encontro as condições biométricas que apresentaram crescimento da altura, número de entrenó, comprimento do entrenó e índice de área foliar (Gráfico 1). Verifica-se dois picos de valores de NDVI para as canas no experimento de plantio de dois verões, um

pico aos 150 dap e outro aos 510 dap, ambos sucessivos ao período posterior aos momentos mais chuvosos do experimento (Figura 2).

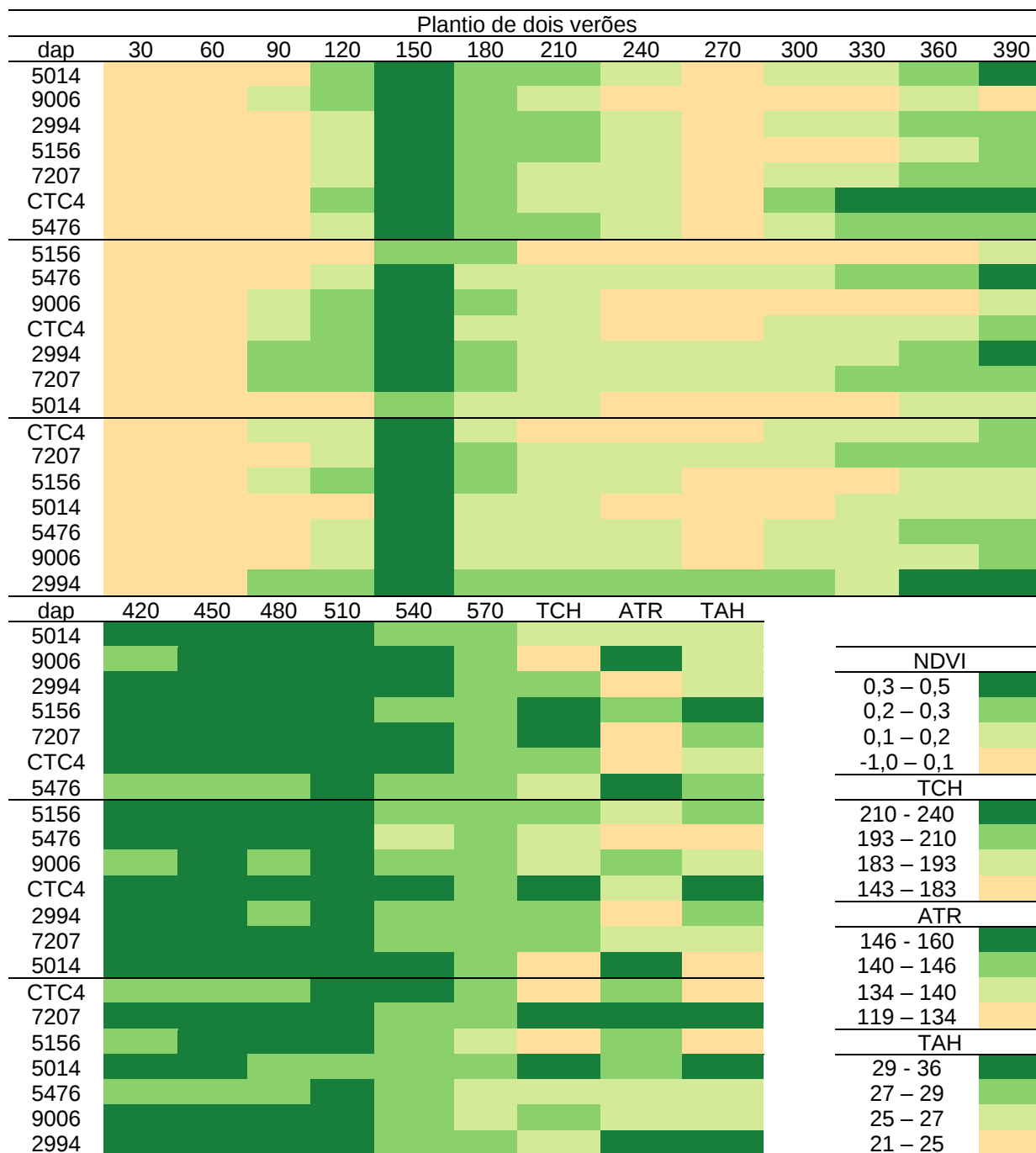


Figura 2. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) das parcelas experimentais seguido pelo valor médio de produtividade no momento da colheita. Variedade, 2994, CTC2994; 9006, CTC9006; 7207, IACCTC07-7207; 5014, RB005014; 5156, RB855156; 5476, RB985476. TCH, toneladas de cana por hectare ($t\ ha^{-1}$); ATR, Açúcar total recuperável ($kg\ t^{-1}$); TAH, toneladas de açúcar por hectare ($t\ ha^{-1}$).

Entretanto, para o plantio de 18 meses, o pico dos valores de NDVI (Figura 3) aconteceu aos 360 dap, e o ATR teve boa correlação negativa com o NDVI neste período ($R = -0,38$) (Figura 1).

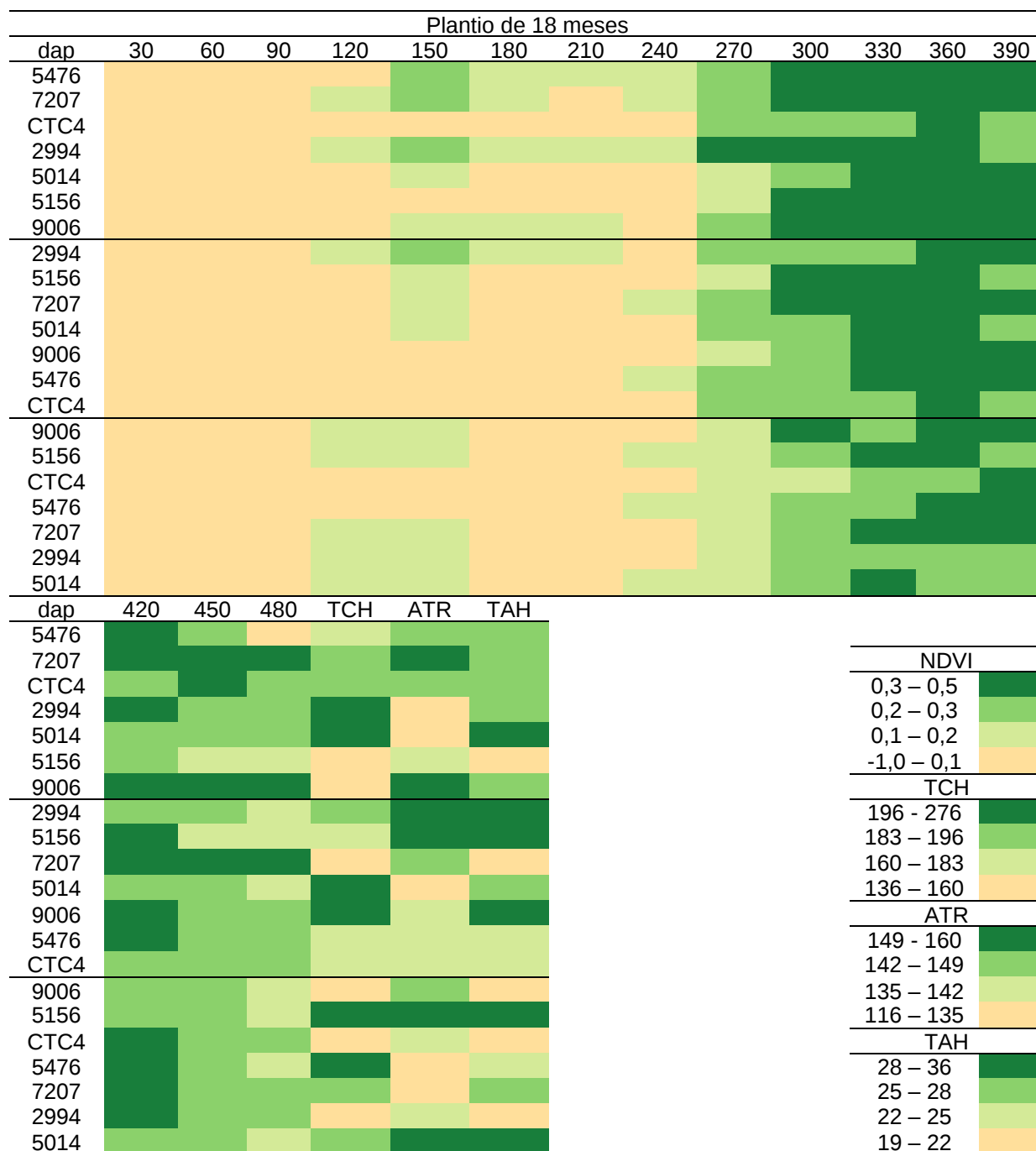


Figura 3. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) das parcelas experimentais seguido pelo valor médio de produtividade no momento da colheita. Variedade, 2994, CTC2994; 9006, CTC9006; 7207, IACCTC07-7207; 5014, RB005014; 5156, RB855156; 5476, RB985476. TCH, toneladas de cana por hectare ($t\ ha^{-1}$); ATR, Açúcar total recuperável ($kg\ t^{-1}$); TAH, toneladas de açúcar por hectare ($t\ ha^{-1}$).

Estes picos de NDVI, das épocas de plantio de dois verões (Figura 2), não tiveram correlação significativa para produtividade (Figura 1).

Quando iniciou o plantio de 18 meses, a cana de plantio de dois verões já estava entre os valores mais altos de NDVI. O plantio de 18 meses demorou 270 dias após o plantio para obter seu primeiro valor alto de NDVI, que foi identificado na variedade CTC2994 (Figura 3). Entretanto, como também aconteceu com o plantio de dois verões, a cana de 18 meses apresentou queda dos valores de NDVI dois meses antes de serem colhidos.

Para as ambas épocas de plantio, observa-se que as variedades que conseguiram permanecer com bons indicadores de NDVI, são as que tiveram melhores produtividades. Casos específicos também aconteceram, onde a mesma variedade foi responsiva para as duas épocas de plantio, como é o caso da variedade IACCTC07-7207.

Neste sentido, buscou-se compreender as bandas espectrais para modelar o melhor indicador e a função mais adequada que capturasse os valores de produtividade em termos de TCH, ATR e TAH (Figura 4). Nos modelos, os indicadores de coeficiente de determinação (R^2) variaram de 0,20 a 0,62, com raiz quadrada do erro médio (RMSE) variando entre 2,59 a 26,76.

No plantio de dois verões, a banda espectral do verde (G) foi a que mais correlacionou entre as outras para modelar os valores de TCH e TAH, enquanto a banda na faixa do vermelho (Red) foi para o ATR (Figura 4).

A ordem de grandeza selecionado foi de acordo com a melhor acurácia pelo indicado RMSE, seguido do melhor indicador de precisão observado pelo R^2 . A ordem de grandeza que mais predominou nas melhores percepções foram a quarta no plantio de dois verões e a terceira ordem para o plantio de 18 meses e para análise conjunta.

A banda na faixa do vermelho predominou na análise como melhor indicador para buscar a compreensão da produtividade para demais épocas de plantio, seguido da banda do infravermelho próximo (NIR). Inclusive, o maior valor de correlação ($R = 0,59$) aconteceu com o NIR para modelar o ATR na época de plantio de 18 meses (Figura 4).

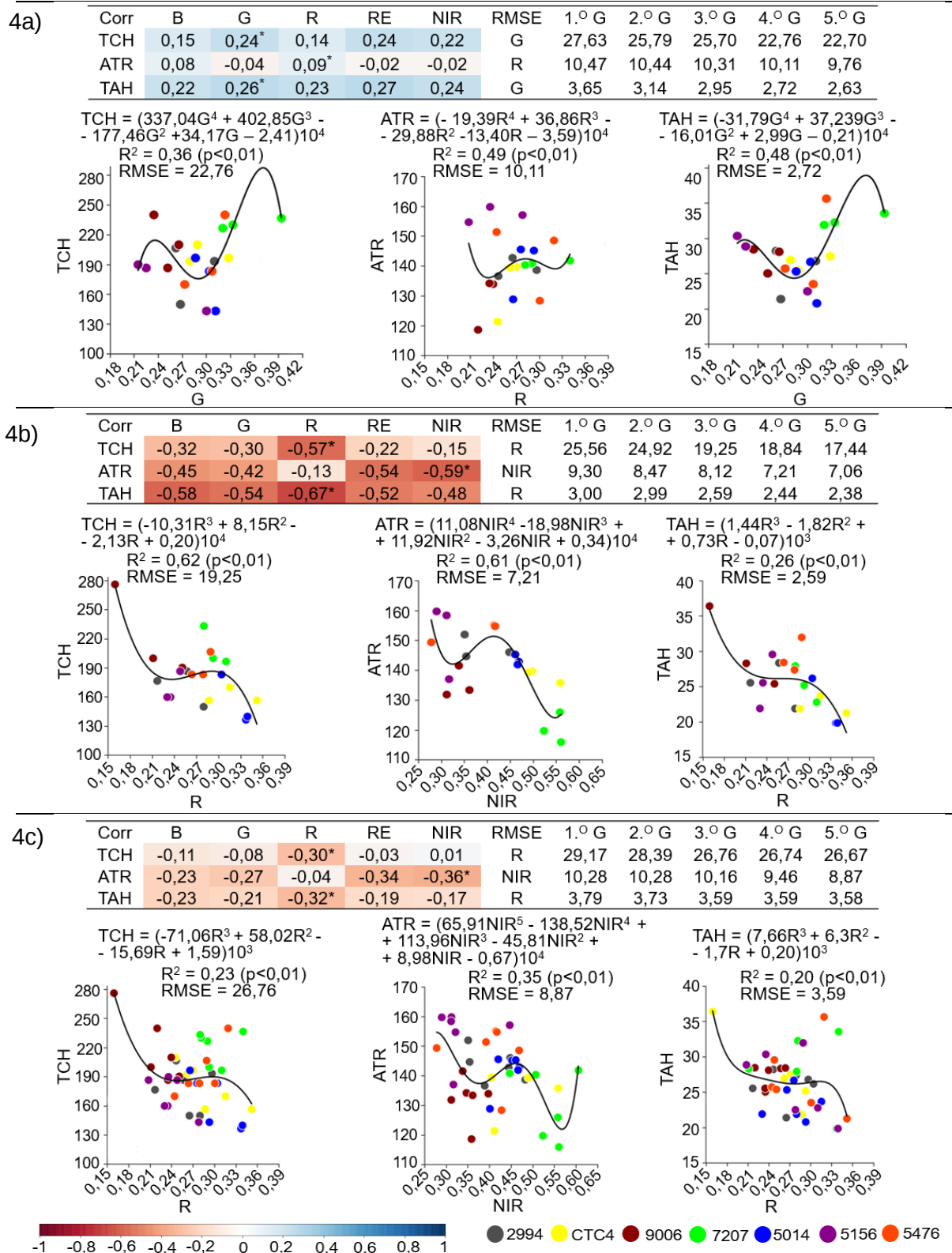


Figura 4. Coeficientes de correlação seguido das equações polinomiais de melhor desempenho. a) Plantio de dois verões; b) Plantio de 18 meses; c) Análise conjunta dos plantios. *: variável mais representativa; Corr: Correlação de Pearson (r); B: Blue; G: Green; R: Red; RE: Red Edge; RMSE: raiz quadrada do erro médio; ºG: grau do polinômio.

Quando avalia as bandas espectrais, percebe-se correlações positivas com os indicadores TCH, ATR e TAH nas canas de dois verões (Figura 4a). Mas, o mesmo comportamento não foi visto para época de plantio de 18 meses e análise conjunta, onde as correlações entre bandas espectrais e indicadores de produtividade são negativos.

Observa-se também que para a modelagem do TAH, tanto para as duas épocas quanto em análise conjunta, foi a que apresentou os menores valores de precisão (RMSE), portanto, sendo mais precisos, e que em nenhum momento as bandas nas faixas do azul (Blue) e Red Edge estiveram entre as mais bem correlacionadas para entender a produtividade.

3.4 Conclusões

Nas condições do experimento, a época de plantio de dois verões teve 7,39% a mais de produtividade média em TCH em comparação ao plantio de 18 meses.

Os indicadores entre NDVI e produtividades mostraram que para o plantio de dois verões as melhores correlações ficam distribuídas ao longo dos dias após o plantio, ao contrário da época de plantio de 18 meses, em que as melhores correlações ficam concentradas em momentos que antecedem a colheita.

A banda espectral na faixa do vermelho (R), seguido pela banda do infravermelho próximo (NIR) e verde (G), foi a mais representativa visando modelar a produtividade em termos de TCH (toneladas de cana por hectare), ATR (açúcar total recuperável) e TAH (toneladas de açúcar por hectare).

3.5 Agradecimentos

Agradecimentos especiais ao programa de pós-graduação em Ciências do Solo da Unesp/ FCAV, Câmpus de Jaboticabal, e ao grupo sucroenergético São Martinho, que acreditaram na importância deste estudo acondicionando diferentes formas de apoio para que não se perdesse a qualidade do trabalho.

3.6 Referências

Banzato DA, Kronka SN (1989) **Experimentação agrícola** Jaboticabal: FUNEP, 247p.
Barbosa M, Oliveira M, Silveira L, Damasceno C, Mendes L (2002) Acúmulo e alocação de nutrientes pela RB72454 no ciclo da cana planta. In: Congresso nacional da sociedade dos técnicos açucareiros e alcooleiros do Brasil - STAB, 8., 2002, Recife. **Anais...** Recife: STAB, p. 264- 267.

Chen, DY (2018) *Análise de dados com Python e Pandas*. Editora Novatec, 431p., 2018.

Coleti JT, Casagrande JC, Stupiello JP, Ribeiro LD, Oliveira GR de (2006) Remoção de macronutrientes pela cana planta e cana soca, em argissolos, variedades RB83486 e SP81-3250. **STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos**, 24: 32-36.

CONSECANA 2006: Conselho dos produtores de cana-de-açúcar, açúcar e álcool do estado de São Paulo. Manual de instruções. Piracicaba: 5ª edição, 111p.

Da Silva, JHB et al. (2023) Uso de vinhaça concentrada e enriquecida como biofertilizante na cana-de-açúcar: Uma revisão. **Scientific Electronic Archives** 16:,1 – 8.

Ferreira EB, Cavalcanti PP, Nogueira DA (2018). ExpDes.pt: pacote experimental designs (Portuguese). R package version 1.2.0.

Ferreira VS, Zanette AF, de Azevedo CG, Boschi LS (2022). Mapeamento de áreas de pastagens do Pontal do Paranapanema para estimativa da produção de etanol. *Research, Society and Development* 11: 1 – 20.

Franco HCJ, Trivelin PCO, Faroni CE, Vitti AC, Otto R (2008) Aproveitamento pela cana-de-açúcar da adubação nitrogenada de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32: 2763-2770.

Hemav Technology – Tecnologia digital voltada para a agricultura (2020). Disponível em: <http://hemav.com/pt-br/>. Acesso em: 07 abril 2020

Holanda LA (2010) Produtividade, índices de crescimento e eficiência no uso da água de irrigação em cana-de-açúcar. UFAL, 24 p.

Malavolta E, Favarin JL, Malavolta M, Cabral CP, Heinrichs R, Silveira JSM (2002) Repartição de nutrientes nos ramos, folhas e flores do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 7: 1017 – 1022.

Matias FI, Harter MVC, Endelman JB (2020) FIELDimageR: An R package to analyze orthomosaic images from agricultural field trials. **The Plant Phenome Journal** 3: 1 – 6.

Meneses TN, Resende RS (2016). Influência de épocas de plantio na eficiência do uso da água da chuva em cultivo irrigado de cana-de-açúcar. **Irriga** 1:291.

Moura Filho G, Almeida A, Silva L, Souza J, Teodoro I, Barbosa G (2006). Crescimento e absorção de nutrientes em quatro variedades de cana-de-açúcar. In: Seminário Alagoano sobre Variedades de Cana-de-açúcar. Maceió, **Anais** ... Maceió: STAB. 1 CD-ROM.

Mulianga B, Bégué A, Clouvel P, Todoroff P (2015). Mapping cropping practices of a sugarcane-based cropping system in Kenya using remote sensing. **Remote Sensing** 7: 14428-14444.

Oliveira ECAD, Freire FJ, Oliveira RID, Oliveira ACD, Freire MBGDS (2011) Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica** 42: 579-588.

Oliveira MW, Mendes LC, Barbosa MHP, Vitti AC, Faria RO (2002). Avaliação de sete variedades de cana-de-açúcar sob irrigação complementar. In: Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas. 15., 2002. Rio de Janeiro, **Anais**... Rio de Janeiro: SBCS. 1 CD- ROM.

Pedroso LL de A, Silva FF da, Melo AM, Junior ME, Shimoya A, Souza CLM (2018) Demandas atuais e futuras da biomassa e da energia renovável no Brasil e no mundo. 2018. **Brazilian Journal of Development** 4: 1980-1996

Prado R de M, Fernandes FM; Natale W (2002). Calcário e Escória siderúrgica, avaliados por análise foliar, acúmulo e exportação de macronutrientes em cana-de-açúcar. **Scientia Agrícola** 59: 129-135.

R Core Team (2020) In: R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

Raij B van (2011) Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 420p.

Resende RS (2013a) Irrigação de cana-de-açúcar. **Revista Canavieiros** 6: 22-26.

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumberras JF, Coelho MR, Almeida JA, Araujo Filho JC, Oliveira JB, Cunha TJF. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. Ed. Revisada e Ampliada. Brasília, DF: Embrapa, p.93-95, 2018.

Silvestre NG, Vieira GHS, Nascimento DP (2019) Estimativa da melhor época de plantio e produtividade de cana-de-açúcar com o modelo agrometeorológico aquacrop. **Revista Ifes Ciência** 5: 197-207.

Simões Neto DE, Oliveira ACD, Freire FJ, Freire MBDS, do Nascimento CW, Rocha ATD (2009) Extração de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar e suas relações com a capacidade tampão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 13: 840-848.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 3ª Ed Revista e Ampliada, Brasília: Embrapa, 2017. 573p.

Thornthwaite CW (1948) An approach toward a rational classification of climate, **Geographical Review** 38: 55–94.

Thornthwaite CW, Mather JR (1955) **The Water Balance**. [s.l.] Drexel Institute of Technology, Laboratory of Technology.

Zhao D, Li YR (2015) Climate change and sugarcane production: potential impact and mitigation strategies. **International Journal of Agronomy** 2015: 1-10

CAPÍTULO 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O compromisso do país em adotar estratégias de curto prazo para alcançar as metas propostas no Acordo de Paris e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) converge com as abordagens científicas deste presente trabalho. Além disso, o presente trabalho está sintonizado com a utilização de sensores espectrais acoplado em Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) visando o planejamento de produção da cana-de-açúcar.

A percepção de que a produção de cana-de-açúcar é prejudicial ao meio ambiente, devido à monocultura, desmatamento e práticas pouco flexíveis focadas apenas no lucro, diminuiu, mas não desapareceu. Ao longo das últimas décadas, especialmente entre os mais informados, essa percepção tem sido suavizada. Atualmente, observa-se uma transformação significativa nos campos, com uma mudança em direção a um sistema que prioriza a rotação de culturas nas áreas de desdobramento durante as entressafras. Esse sistema também adota práticas como compostagem, adubo verde, fertirrigação e uso de fungos entomopatogênicos.

Essa evolução incorpora com a colheita mecanizada da cana crua, as áreas de preservação permanente, e a implantação de tecnologias de ponta, como sensores, ARPs e conectividade em campo, buscando minimizar a intervenção humana para uma produção sustentável e que ofereça empregos e oportunidade de qualificações profissionais.

A produção de energia limpa a partir de recursos próprios da cana, como na queima do bagaço em caldeiras e coogeração de energia elétrica. Mesma energia elétrica que irá alimentar a fábrica para produção de açúcar e etanol, levedura, e mais recente das investidas a produção de biometano a partir da biodigestão da vinhaça. Estas adoções aumentam as percepções do protagonismo da cana-de-açúcar frente as metas do Brasil para o desenvolvimento sustentável e a mitigação de gases de efeito estufa.

Frente ao desafio do aquecimento global, muitos debates concentram-se nos derivados do petróleo e das mudanças de uso e manejo de solo, mas poucos trabalhos exploram as emissões de CO₂ em cenários de diferentes materiais genéticos sob épocas diferentes de plantio. Desta forma, no capítulo 2, pode se observar o comportamento distinto que ocorre nas relações entre solo e atmosfera,

especialmente em áreas de manejo varietal mais recentes, indicando um potencial significativo na redução das emissões de CO₂ em comparação com variedades mais antigas.

Ao contrário da maioria dos estudos que oferecem leituras contínuas a curto prazo, este trabalho adotou uma abordagem única. Os mesmos equipamentos robustos, onerosos e de difíceis leituras foram empregados ao longo de todas as fases do desenvolvimento da cana-de-açúcar, em todas as estações, respeitando rigorosamente as regras estatísticas amostrais. Os desafios enfrentados nas duas épocas de plantio para as sete variedades de cana-de-açúcar asseguram que os resultados do Capítulo 2 se aproximem das condições reais de desenvolvimento do sistema em áreas comerciais.

Vale destacar que com a modelagem do sistema CO₂ utilizando como entrada variáveis biofísicas do solo e análises espectrais, o presente trabalho também aborda as nuances encontradas na mensuração deste fluxo em diferentes épocas de plantio.

Não obstante, o planeta está carente de maior produção sem precisar de desmatar mais áreas. A agricultura, por exemplo, busca alternativas com bioestimulantes para atender as demandas nutricionais da cultura. O investimento contínuo em manejos integrados com visão holística é crucial. Por isto, é importante que todo produtor fique atento as novas ferramentas que alavancam a produtividade. Neste sentido, as relações espectrais com os indicadores de produtividade encontrados no capítulo 3 ajudam a demonstrar como existem relações importantes entre dados espectrais e de produtividades que podem ajudar no planejamento e monitoramento da safra.

A incorporação de sensores acoplados as ARPs permite identificar os momentos ideais que expressam as respostas produtivas no momento da colheita, além de selecionar as bandas espectrais que melhor representam a resposta da produção tanto em quantidade de toneladas de cana-de-açúcar quanto em qualidade da matéria prima.

Nesta difícil, mas valiosa empreitada de acompanhar todo desenvolvimento do canavial, desde a seleção de mudas nas biofábricas, preparação da área, plantio, manejo de pragas, biometrias, leituras com sensores em campo, voo com drones, colheita, tudo ajudou a trazer importantes informações que podem ser acompanhadas

ao longo dos capítulos do presente estudo, sobretudo para estudos relacionados ao plantio de dois verões.

Entretanto, destaca-se a importância de seguir com trabalhos futuros visto o dinamismo que vem ocorrendo com o manejo e adoção de tecnologias. Fatores como irrigação, pragas, adubação, aliados as diferentes condições ambientais, seriam as que, provavelmente, interfeririam na complexidade das emissões de CO₂ por variedade e na resposta produtiva do canavial.

Portanto, buscou-se contemplar no decorrer deste trabalho abordagens de diferentes partes do conhecimento, desde comportamento biométrico frente épocas de plantio, dados reais de campo, preparação de dados e avaliações estatísticas, a processamento de imagens e modelagem de sistemas visando CO₂, TCH, ATR e TAH. Assume, assim, assegurar que diante este contexto, estes estudos possam ajudar a direcionar medidas de políticas públicas de descarbonização do planeta e nos avanços tecnológicos em prol das melhores práticas produtivas no setor canavieiro.

Por fim, o avanço de novas pesquisas abordando diversas épocas de plantio de cana-de-açúcar e ampliando o escopo para mais variedades promete agilizar, a curto prazo, a compreensão das emissões de gases de efeito estufa nos campos de cana. Paralelamente, a acessibilidade e facilidade de uso, e o mínimo impacto ambiental das ARPs equipados com sensores espectrais, oferecem uma oportunidade valiosa para monitorar a produtividade de forma contínua.

Esses avanços tecnológicos não apenas contribuem para a pesquisa científica, mas também apresentam um potencial substancial para otimizar práticas agrícolas, sendo elementos cruciais para o sucesso sustentável em qualquer empreendimento.