

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS
UNIDADE FRUTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS

APLICAÇÃO DE VINHAÇA LOCALIZADA: EFEITOS NO
SOLO E NA CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR

Arthur César Monico
Bacharel em Ciências e Tecnologia de Laticínios

FRUTAL-MG
2025

Arthur César Monico

**APLICAÇÃO DE VINHAÇA LOCALIZADA: EFEITOS NO
SOLO E NA CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada à Universidade do Estado de Minas Gerais, Unidade Frutal, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Eduardo da Silva Martins

Coorientadora

Dr^a. Osania Emerenciano Ferreira

FRUTAL-MG

2025

Monico, Arthur César

M744a Aplicação de Vinhaça Localizada: Efeitos no Solo e na Cultura de Cana-de-Açúcar.

114 f. : il. color., tab., fig.

Orientador: Dr. Eduardo da Silva Martins. Co-Orientador: Dr^a. Osania Emerenciano Ferreira.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado de Minas Gerais, UEMG. Unidade Frutal, 2025.

1. Cerrado. 2. CTC 9002. 3. Fertilização Localizada. 4. Vinhaça. I. Martins, Eduardo da Silva. II. Ferreira, Osania Emerenciano. III. Universidade do Estado de Minas Gerais - Unidade Frutal. IV. Título.

CDU: 631.841

Catalogação na fonte

Nereida Nanci Pimenta dos Santos – CRB-6/4379/O



GOVERNO DO ESTADO DE MINAS GERAIS

Ata

ARTHUR CÉSAR MONICO

"APLICAÇÃO DE VINHAÇA LOCALIZADA: EFEITOS NO SOLO E NA CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR"

Dissertação apresentada a Universidade do Estado de Minas Gerais, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, na área de concentração Ciências Ambientais, Linha de Pesquisa Diagnóstico e Ecologia Ambiental a obtenção do título de Mestre.

APROVADO em 28 de abril 2025

Profª. Drª. Márcia Justino Rossini Mutton - UNESP - Jaboticabal- SP

Profª. Drª. Mara Cristina Pessoa da Cruz - UNESP- Jaboticabal - SP

PROF. DR. EDUARDO DA SILVA MARTINS

UEMG FRUTAL/ORIENTADOR



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo da Silva Martins, Professor de Educação Superior**, em 09/05/2025, às 08:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mara Cristina Pessoa da Cruz, Usuário Externo**, em 13/05/2025, às 09:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



Documento assinado eletronicamente por **Márcia Justino Rossini Mutton, Usuário Externo**, em 28/05/2025, às 14:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.mg.gov.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **112443543** e o código CRC **04C62A9D**.

Referência: Processo nº 2350.01.0007712/2024-40

SEI nº 112443543

Dedicatória

A minha querida, amada Mãe, Silvia, minha irmã Bianca e meus queridos sobrinhos, Ana Luiza e José Messias. Com vocês aprendi o real significado de amor fora do peito, porque a família é a base de tudo e vocês, independentemente de qualquer coisa, são minha base!

Dedico também aos meus queridos amigos que sempre me acompanharam e sempre acreditaram em mim, obrigado Adriana e Lizandra.

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas
Graças a Deus, não sou o que era antes”.*

Marthin Luther King

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a DEUS, Pai todo poderoso, criador dos céus e da terra, por me dar força e fé nos momentos em que nem eu mesmo acreditei em mim. Ao meu irmão Senhor Jesus Cristo que me guia e orienta para sempre estar na presença de meu Pai.

A minha mãe Silvia, minha irmã Bianca e meus sobrinhos, Ana Luiza e José Messias, por todo carinho, amor, paciência e apoio em todas as horas.

A UEMG Unidade Frutal, ao PPGCIAMB, os docentes e a Maiza que sempre nos atenderam com cordialidade e competência.

Ao meu querido orientador, Professor Eduardo, meu querido Teacher, pela orientação, preparação, confiança e apoio logístico, confiando em mim ao longo desse projeto.

A minha querida amiga e coorientadora Osania, por toda cobrança, ensinamentos, reagentes, ideias, idas e vindas ao campo, e tudo que amenizou e intensificou a minha jornada.

Ao Grupo Guidastre, à Fernanda e seu irmão Júnior, que cederam a área para desenvolvermos a pesquisa e contribuíram com tudo que pedimos ao longo do projeto.

A minha amiga Adriana, que me inspirou, auxiliou, me mostrou como a vida pode ser completa na presença de DEUS, por esse motivo, você será lembrada para sempre.

Ao Heytor Lemos, por toda ajuda nas horas mais precisas.

A Mariana Silvério, por todo apoio, risadas, comentários, canções cantadas, causos e experiências da vida compartilhados, minha querida, você foi incrível.

As minhas queridas parceiras do bonde: Alessandra, Júlia, Palmira e Vitória, companheiras de sala, do mestrado e da vida, por terem me dado tanto em pouco tempo, vocês são as minhas amigas de graduação que eu não tive, são especiais! Amo vocês!!!!

Aos alunos da Engenharia Agrônômica da UEMG Unidade Frutal, meninos e meninas, eu não conseguiria se não fosse vocês, estarão para sempre nos meus agradecimentos.

A todos que de alguma forma contribuíram para realização deste projeto. Fica o meu eterno agradecimento.

RESUMO

A fertirrigação com vinhaça é uma prática que envolve a aplicação controlada desse subproduto orgânico no solo, com o objetivo de fornecer nutrientes às plantas e melhorar sua fertilidade. Rica em compostos orgânicos e nutrientes como potássio e nitrogênio, a vinhaça, proveniente da produção de etanol, representa uma alternativa sustentável para reduzir a dependência de adubos químicos e irrigação. A técnica de fertirrigação localizada surgiu como solução inovadora, promovendo aplicação homogênea ao longo das linhas de plantio, otimizando recursos hídricos e nutrientes, além de minimizar riscos ambientais. Os experimentos conduzidos utilizaram a variedade de cana-de-açúcar CTC 9002, caracterizada por seu alto rendimento e adaptabilidade a diferentes condições climáticas. Foram analisados solos tratados com vinhaça e controle, ao longo de quatro estações, utilizando biometria e metabolômica para avaliar o desempenho da variedade. Os resultados demonstraram benefícios significativos para a planta e o solo nos tratamentos com vinhaça. Observou-se maior crescimento das plantas, maior retenção de água no solo e aumento da atividade microbiológica, especialmente de microrganismos solubilizadores de potássio e fixadores de nitrogênio. A análise tecnológica apontou grande interação dos compostos tecnológicos da cana, enquanto o perfil metabolômico revelou maior eficiência na absorção e assimilação de nutrientes em áreas tratadas com vinhaça. A fertirrigação localizada se mostrou vantajosa tanto para propriedades químicas quanto biológicas do solo. Assim, o uso de vinhaça em fertirrigação localizada destaca-se como estratégia viável para práticas agrícolas mais sustentáveis e produtivas.

Palavras-chave: Cerrado, CTC 9002, fertilização localizada, vinhaça.

ABSTRACT

Fertigation with vinasse is a practice that involves the controlled application of this organic byproduct to the soil, aiming to supply nutrients to plants and improve soil fertility. Rich in organic compounds and nutrients such as potassium and nitrogen, vinasse—derived from ethanol production—represents a sustainable alternative to reduce reliance on chemical fertilizers and conventional irrigation. The localized fertigation technique has emerged as an innovative solution, enabling uniform application along planting rows, optimizing water and nutrient use, and minimizing environmental risks. The experiments conducted used the sugarcane variety CTC 9002, known for its high yield and adaptability to different climatic conditions. Soils treated with vinasse and control plots were analyzed over four seasons, employing biometry and metabolomics to evaluate varietal performance. The results demonstrated significant benefits for both plants and soil under vinasse treatments. Increased plant growth, higher water retention in the soil, and enhanced microbiological activity especially of potassium-solubilizing and nitrogen-fixing microorganisms were observed. Technological analysis revealed strong interaction among sugarcane's technological compounds, while the metabolomic profile indicated greater efficiency in nutrient uptake and assimilation in vinasse-treated areas. Localized fertigation proved advantageous for both the chemical and biological properties of the soil. Thus, the use of vinasse in localized fertigation stands out as a viable strategy for more sustainable and productive agricultural practices.

Keywords: Brazilian Savannah, CTC 9002, localized fertilization, vinasse.

SUMÁRIO

	Página
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL	15
CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1. Qualidade do solo.....	18
2.2. A ocupação e a sazonalidade do bioma Cerrado.....	18
2.3 A produção da cana-de açúcar.....	20
2.4. Vinhaça: um subproduto e alternativa na fertirrigação localizada.....	22
2.5. Microrganismos e sua relação com o solo.....	26
2.6. Metabolômica da cana-de-açúcar e suas aplicações.....	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29
CAPÍTULO 3 – APLICAÇÃO DA VINHAÇA LOCALIZADA: EFEITOS NOS	
ATRIBUTOS FÍSICO-QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO	
SOLO.....	39
RESUMO.....	39
ABSTRACT.....	40
1. INTRODUÇÃO.....	41
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	42
2.1. Análises físico-químicas dos solos.....	43
2.1.1. Obtenção de TFSA.....	44
2.1.2. Análise de umidade do solo.....	44
2.1.3. Análise de pH do solo.....	44
2.1.4. Análise de condutividade elétrica do solo.....	44
2.1.5. Análise dos íons de Cálcio (Ca), Fósforo (P), Magnésio (Mg), Potássio (K), Ferro (Fe) e Zinco (Zn).....	45
2.1.6. Cálculo da Soma de bases (SB) e o percentual da Saturação de bases (V).....	46
2.2. Análises de caracterização da vinhaça.....	46
2.2.1. Análise de pH da vinhaça.....	46

2.2.2. Análise de condutividade elétrica da vinhaça.....	47
2.2.3. Análise de nitrogênio (digestão sulfúrica) da vinhaça.....	47
2.2.4. Digestão nítrico-perclórica da vinhaça (Análise de nitrogênio).....	47
2.3. Contagem de microrganismos do solo: diluição e preparo das amostras para contagem de microrganismos.....	48
2.3.1. Bactérias totais, bactérias fixadoras de N e solubilizadoras de P e K (BT, BFN, BSF e BSK)	48
2.3.2. Fungos totais (FT).....	49
2.4. Determinação das atividades enzimáticas no solo.....	49
2.4.1 Determinação da atividade de desidrogenase.....	49
2.5. Análises biológicas do solo.....	50
2.5.1. Análise de RBS.....	50
2.5.2. Análise de CBM.....	51
2.5.3. Análise de COT.....	52
2.5.4. Análise de qCO ₂	54
2.5.5. Análise de qMic.....	54
2.6. Análise estatística.....	54
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
3.1. Análise de pH e condutividade elétrica do solo.....	55
3.2. Análises físico-químicas da vinhaça.....	56
3.3. Análises dos íons de Cálcio (Ca), Fósforo (P), Magnésio (Mg), Potássio (K), Ferro (Fe), Zinco (Zn), Soma de bases (SB) e o percentual da Saturação de bases (V).....	57
3.4. Umidade gravimétrica e análises microbiológicas.....	61
3.5. Análises enzimáticas e metabólicas.....	65
3.6. Análise de componentes principais (PCA) dos parâmetros.....	69
4. CONCLUSÃO.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	729

CAPÍTULO 4 – PARALELO ENTRE A BIOMETRIA E METABOLÔMICA DA CANA-DE-AÇÚCAR APÓS A APLICAÇÃO DE VINHAÇA LOCALIZADA.....	81
RESUMO.....	81
ABSTRACT.....	82
1. INTRODUÇÃO.....	83
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	84
2.1. Análise biométrica da cana.....	88
2.2. Análise tecnológica do caldo.....	88
2.2.1. Análise de pH do caldo.....	89
2.2.2. Análise do Brix.....	89
2.2.3. Análise da acidez sulfúrica total do caldo (ASC).....	89
2.2.4. Análise de Fenol.....	90
2.2.5. Determinação de açúcar redutor total (Metódo DNS) (ART).....	90
2.2.6. Análise do teor de carboidratos: sacarose no Brix, glicose, frutose e sacarose....	91
2.2.7. Cálculo para TBH e TCH.....	91
2.3. Preparação das folhas A+1 para análise metabolômica.....	91
2.3.1. Análise de nitrogênio (digestão sulfúrica) das folhas com 3 meses (N3), com 6 meses (N6) e antes da colheita (NFAC).....	91
2.3.2. Análise Metabolômica por Ressonância Magnética Nuclear de Hidrogênio (RMN de ¹ H).....	92
2.3.3 Análise Quimiométrica.....	93
2.4. Análise Estatística.....	93
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	94
3.1. Análise de RMN de ¹ H.....	100
4. CONCLUSÃO.....	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107
ANEXOS.....	113

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2	Página
Figura 1 - Climatografia anual do Cerrado.....	20
Figura 2 – Gráfico da área de produção da cana-de-açúcar na região Sudeste, safra 22/23 e 24/25.....	21
Figura 3 – Fluxograma do processo de produção do etanol e açúcar.....	22
Figura 4 – Esquema da estrutura, composição e organização de um agregado do solo.....	26
 CAPÍTULO 3	
Figura 1 – Mapa de localização dos pontos demarcados para as áreas de pesquisa.....	55
Figura 2 - Relação comparativa entre os manejos avaliados, onde A observou o faixa do pH e em B a CE (condutividade elétrica) do solo.....	53
Figura 3 – Gráfico de temperaturas e precipitações ao longo do ano na área do experimento.....	57
Figura 4 – Comportamento do Cálcio (A), Fósforo (B), Potássio (C), Magnésio (D), Ferro (Fe), Zinco (E) e Ferro (F) na presença ou não de fertirrigação ao longo das estações.....	59
Figura 5 – Comportamento da Soma de bases (SB) (A) e Saturação de bases (V%) (B) na presença ou não de fertirrigação ao longo das estações.....	60
Figura 6 – Comportamento da Umidade na presença ou não de fertirrigação ao longo das estações.	61

Figura 7 – Comportamento da contagem de bactérias totais (BT) (A) e fungos totais (FT) (B) na presença ou não de fertirrigação ao longo das estações.....	62
Figura 8 – Comportamento da contagem de bactérias solubilizadoras de fósforo (BSP) (A), e contagem de bactérias solubilizadoras de potássio (BSK) (B) e a contagem de bactérias fixadoras de nitrogênio (BFN) (C) na presença ou não de fertirrigação ao longo das estações.....	64
Figura 9 – Comparação da produção de desidrogenase na presença ou não de fertirrigação ao longo das estações.....	66
Figura 10 – Comparação de respiração basal do solo (RBS) (A) e a produção do carbono orgânico do solo (COT) (B) na presença ou não de fertirrigação ao longo das estações.....	67
Figura 11 – Comparação de produção do carbono de biomassa (CB) (A), de quociente metabólico (qCO_2) (B) e o quociente microbiano ($qMic$) (C) na presença ou não de fertirrigação ao longo das estações.....	68
Figura 12 – Análise dos componentes principais analisados ao longo da pesquisa no biênio 2023/2024.....	71

CAPÍTULO 4

Figura 1 – Mapa de localização dos pontos demarcados para as áreas de pesquisa.....	85
Figura 2 – Temperatura e precipitação ao longo do ano na área do experimento.....	86
Figura 3 – Etapas do experimento de análises biométricas e metabolômicas da cana.....	87
Figura 4 – Correlação de Pearson entre as variáveis de qualidade biométricas e de qualidade tecnológicas da cana-de-açúcar.....	96
Figura 5 – Análise de componentes principais (PCA) entre as variáveis de qualidade biométricas e de qualidade tecnológicas da cana-de-açúcar, comparando o manejo irrigado com vinhaça com o sem irrigação.....	98

Figura 6 - Espectros de RMN de ^1H (tampão KH_2PO_4 em D_2O /metanol- d_4 1:1, 600 MHz) dos extratos de folhas de cana-de-açúcar cultivadas em solo sem vinhaça (C, controle), com adubação empregando a vinhaça (V, vinhaça)	101
Figura 7 - Gráfico dos valores de $-\log$ (p-valor) obtidos a partir da ANOVA one-way. Os bins não significativos são apresentados em cinza (n = 39)	101
Figura 8 - Gráfico de escores da componente 1 (PC1) versus componente 2 (PC2) da Análise de Componentes Principais (PCA), obtido a partir dos espectros de RMN de ^1H dos extratos de folhas de cana-de-açúcar sem adição de vinhaça (C) e com adição de vinhaça (V) aos 3 e 12 meses após o plantio.....	102
Figura 9 - PCA biplot obtido a partir dos espectros de RMN de ^1H dos extratos de folhas de cana-de-açúcar sem adição de vinhaça (C) e com adição de vinhaça (V) aos 3 e 12 meses após o plantio.....	103
Figura 10 - Gráficos de scores da análise estatística supervisionada OPLS-DA obtido a partir dos espectros de RMN de ^1H dos extratos de folhas de cana-de-açúcar sem adição de vinhaça (C) e com adição de vinhaça (V) aos 12 meses após o plantio.....	104
Figura 11 - Gráficos de vip scores da análise estatística supervisionada OPLS-DA obtido a partir dos espectros de RMN de ^1H dos extratos de folhas de cana-de-açúcar sem adição de vinhaça (C) e com adição de vinhaça (V) aos 12 meses após o plantio.....	105

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2	Página
Tabela 1 - Composição química da vinhaça.....	23
CAPÍTULO 3	
Tabela 1 – Dados sobre a fertirrigação localizada nas áreas de pesquisa.....	43
Tabela 2 – Composição da vinhaça utilizada para fertirrigar as áreas avaliadas.....	57
CAPÍTULO 4	
Tabela 1 – Composição da vinhaça utilizada para fertirrigar as áreas avaliadas.....	87

1. CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL

O Cerrado é o segundo maior ecossistema brasileiro, cobrindo 23% de área habitada por diversos tipos de espécies (Versiani *et al.*, 2021). No entanto, é o bioma que mais sofre com a exploração agrícola e diminuição anual de cobertura remanescente, o que gera perda de biodiversidade em escalas de micro a macro organismos (Maranhão *et al.*, 2017; Schwaida *et al.*, 2017).

As ações humanas buscam por soluções que intensificam os benefícios na produção das culturas agrícolas pretendendo diminuir os impactos ambientais, o que frequentemente resulta na descaracterização do Cerrado. A adoção de práticas de manejos agrícolas deve estar associada aos períodos de sazonalidade do ano, pois cada fator abiótico e biótico interage de forma diferente ao longo das estações, seja pela incidência de luz solar, baixas temperaturas, desfolha das plantas, aumento da vegetação, maior movimentação de insetos e animais, mineralização e disponibilização de carbono e nitrogênio, entrada de ar e pluviometria (Lacerda; Mapeli, 2021; Gerlach, 2022).

O Cerrado, com sua rica biodiversidade e características únicas de solo e clima, oferece um ambiente propício para o cultivo da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), uma cultura de grande relevância econômica e social no País. O manejo adequado dos nutrientes é essencial para o desenvolvimento da planta, não apenas promovendo a produtividade e a qualidade, mas também contribuindo para a sustentabilidade do sistema agrícola, garantindo a manutenção da fertilidade do solo e a otimização do uso dos recursos naturais. Dessa forma, a integração entre o uso responsável do cerrado, o cultivo eficiente da cana-de-açúcar e a aplicação adequada de práticas agronômicas reflete não apenas em ganhos econômicos para os produtores, mas também em benefícios ambientais e sociais, consolidando uma relação sinérgica e positiva entre a atividade agrícola e o ecossistema do Cerrado (Andrade, 2018; Martins Filho *et al.*, 2019; Fortini *et al.*, 2020).

Neste sentido, a produção da cana-de-açúcar vem ganhando importância no cenário brasileiro, uma vez que vem se destacando o uso do etanol como fonte alternativa ao combustível fóssil para o Brasil e o mundo, apresentando menores custos de produção e extração. Por outro lado, há também a produção de subprodutos deste processo, como a

vinhaça, torta de filtro, palha, entre outros que possuem alto potencial poluidor, caso não tenham um manejo adequado (Araújo; Sobrinho, 2021).

A vinhaça é muito utilizada na fertirrigação de canaviais. Se for tratada, gerida e dosada na quantidade necessária, gera redução nos gastos com fertilizantes, promove melhorias nas propriedades químicas, físicas e microbiológicas do solo (Baptista; Coneglian, 2020).

Recentemente, a aplicação localizada da vinhaça tem ganhado destaque, tornando o manejo do subproduto mais eficiente e uniforme. Essa técnica distribui a vinhaça equitativamente ao longo das linhas de cultivo, aumentando consideravelmente a área beneficiada, se comparada com o sistema de canhões aspersores. A aplicação localizada melhora a homogeneização, resultando em maior segurança ambiental e menor impacto para o local da lavoura, como a rápida acidificação do solo. Esta técnica, aplicada principalmente durante o trato cultural da cana soca, além de promover a irrigação e melhorar a brotação da soqueira, serve como veículo para outros produtos, além dos nutrientes tradicionais como potássio, cálcio e magnésio (Biotrop, 2022).

A prática da fertirrigação localizada com vinhaça tem impacto nas características físico-químicas e biológicas de áreas com cultivos de cana-de-açúcar. A vinhaça, sendo um subproduto da produção de etanol, quando aplicada de forma adequada, pode proporcionar benefícios ao solo, como o fornecimento de água, nutrientes e a melhoria da sua estrutura (Almada *et al.*, 2021). No entanto, a dose e o momento de aplicação, se não controlados corretamente, podem causar desequilíbrios químicos e impactos negativos na microbiota local. Além disso, as variações sazonais, como mudanças na temperatura, umidade e padrões de precipitação, influenciam significativamente a eficiência da fertirrigação e os processos biológicos do solo, afetando a disponibilidade de nutrientes e a atividade microbiana (Wheeler *et al.*, 2021).

A vinhaça contém vários compostos orgânicos, incluindo açúcares, ácidos orgânicos, aminoácidos, e também nutrientes (P, K, Ca e N). Ao ser aplicada no solo, os nutrientes são absorvidos pelas raízes da cana-de-açúcar e entram no seu metabolismo, afetando diretamente a síntese de metabólitos específicos (Carpanez *et al.*, 2022). No entanto, é importante ressaltar que os efeitos da fertirrigação com vinhaça na metabolômica da cana-de-açúcar podem variar dependendo de diversos fatores, incluindo a concentração de

nutrientes na vinhaça, a frequência e o método de aplicação, as características do solo e as condições ambientais.

Diante do exposto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o uso da vinhaça em aplicação localizada, a sazonalidade e como estes fatores modificam: as características físico-químicas, enzimáticas e biológicas de solos com cultura de cana-de-açúcar; a metabolômica e a biometria da planta. Para conclusão desta pesquisa foram testadas as seguintes hipóteses: A fertirrigação localizada e a sazonalidade influenciam as características físico-químicas e biológicas dos solos em cultivos de cana-de-açúcar, em comparação com solos sem aplicação de vinhaça; a aplicação de vinhaça localizada afeta a metabolômica e a biometria da cana-de-açúcar.

Este trabalho foi estruturado em quatro seções distintas, que inclui a Introdução Geral (Capítulo 1), a Revisão Bibliográfica (Capítulo 2) com levantamento bibliográfico sobre os temas que envolvem a pesquisa, tais como: qualidade do solo; a ocupação e a sazonalidade do Cerrado; a produção da cana-de-açúcar; vinhaça: um subproduto e alternativa na fertirrigação localizada; microrganismos e sua relação com o solo; e metabolômica da cana-de-açúcar e suas aplicações.

No Capítulo 3 estão apresentadas as propriedades físico-químicas de solo sem tratamento e submetido à prática de fertirrigação localizada com vinhaça, comparando os seguintes aspectos: quantificação de nutrientes como Ca, Mg, P, K, Fe e Zn; pH, microbiota presente no ambiente como fungos e bactérias totais, bactérias fixadoras de nitrogênio e solubilizadoras de fósforo e potássio, com o intuito de compreender o impacto da fertirrigação localizada com vinhaça na população desses microrganismos; atividade de desidrogenase; teores de matéria orgânica e biomassa microbiana, e quocientes microbiano e metabólico do solo.

O Capítulo 4 caracteriza as propriedades metabolômicas e biométricas da cana nas áreas avaliadas, comparando-as entre si a partir de: avaliação biométrica de plantas *in loco*, extração do caldo e quantificação de compostos de interesse tecnológico como sacarose, glicose, frutose, açúcar redutor total, compostos fenólicos, TBH (tonelada de Brix por hectare), TCH (toneladas de cana por hectare), a metabolômica (avaliada a partir da análise por ressonância magnética nuclear de hidrogênio e análise quimiométrica das folhas A+1 colhidas aos três, seis meses e antes de serem colhidas).

CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Qualidade do solo

O solo é essencial para a agricultura, influenciando o crescimento das plantas e a produção de alimentos. Seu manejo adequado é crucial para manter a fertilidade e ciclagem em longo prazo. Fatores abióticos como água, nutrientes, intempéries e a interação biótica, composta por microrganismos e suas atividades metabólicas, são essenciais para a ciclagem de nutrientes e biodiversidade (Ormay; Guimarães, 2024).

A qualidade do solo é fundamental para seu equilíbrio, sendo influenciada por diversas interações enzimáticas oriundas de microrganismos que desempenham papel crucial na transformação dos resíduos orgânicos e no ciclo de nutrientes. Essas interações enzimáticas são essenciais para a manutenção da capacidade produtiva do solo. Assim, compreender e monitorar a atividade enzimática extracelular do solo é necessário para adotar práticas de manejo sustentáveis e garantir a saúde e produtividade dos solos agrícolas (Sobucki *et al.*, 2021).

A relevância dos microrganismos é amplamente estudada, uma vez que são elementos formadores do solo e desempenham papel essencial na decomposição de resíduos orgânicos, resultando na ciclagem de nutrientes, na formação de matéria orgânica e no sequestro de elementos como carbono e nitrogênio. As interações entre diversas comunidades de organismos do solo desempenham papel fundamental no funcionamento do solo e em processos associados à cadeia trófica. Estes atributos microbianos do solo, juntamente com a diversidade microbiana, atividade enzimática, taxa de respiração e biomassa microbiana, são considerados indicadores sensíveis que desempenham papéis importantes no monitoramento de mudanças ambientais decorrentes das práticas e manejos agrícolas. Esses indicadores não apenas fornecem orientação para o planejamento e avaliação das práticas de manejo empregadas, mas refletem em propriedades do solo que são influenciadas pela atividade biológica (Silva *et al.*, 2021).

2.2. A ocupação e a sazonalidade do bioma Cerrado

O Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro, cobrindo mais de 200 milhões de hectares, ocupando cerca de 23% da área total do território brasileiro, integrando mais de 12 estados e o Distrito Federal, transcorrendo altitudes que variam entre 300 m a 1.600 m. É

tido como um dos *hotspots* do planeta e considerado a savana mais biodiversa do mundo (Duarte; Leite, 2019). Apesar disso, suas áreas remanescentes ainda enfrentam degradação por parte das atividades antropomórficas, desmatamentos, queimadas e agricultura (Sano *et al.*, 2019).

A porcentagem da cobertura nativa original do Cerrado é de 20%, sendo que o restante foi modificado ou a agropecuária ocupou (MapBiomas, 2025). Essa ocupação da terra se deve pela expansão agrícola e o uso pelo agronegócio que vem crescendo cerca de 6,2 vezes ao ano desde 1985 (Ramos *et al.*, 2020).

A territorialização do setor sucroalcooleiro e as práticas do agronegócio têm provocado impactos significativos na paisagem e na dinâmica da paisagem do Cerrado de Minas Gerais ao longo dos anos. A expansão do cultivo de monoculturas, como a cana-de-açúcar, sem o devido manejo correto do solo, tem levado à degradação do solo, causada pelo uso excessivo e inadequado, o que compromete não apenas a fertilidade, mas também a sustentabilidade das práticas agrícolas (Tamborin; Santos, 2020). Nesse contexto, é fundamental compreender a relação entre a modernização da agricultura e as características do solo do Cerrado para avaliar os impactos ambientais e sociais dessa ocupação. Assim, a adoção de uma gestão integrada é essencial, considerando tanto o desenvolvimento econômico quanto a preservação ambiental, para garantir a sustentabilidade desse bioma estratégico (Cintra *et al.*, 2020; Alves *et al.*, 2023).

Mesmo com todas essas adversidades, o Cerrado ainda é tido como o segundo bioma mais rico em biodiversidade de fauna e flora, sendo esta última diretamente interligada a produção da camada vegetal do solo que contribui para maior aporte de resíduos vegetais e manutenção dos teores de matéria orgânica, que são elementos importantes para a melhoria da sua qualidade. Além disso, a presença de cobertura vegetal nativa é um fator que contribui para a manutenção da matéria orgânica e da densidade do solo (Novak *et al.*, 2021). Este deve conter em sua estrutura uma cobertura de camada vegetal, para que haja a proteção das propriedades físico-químicas e microbiológicas, além de fornecer matéria orgânica e servir de proteção contra as intempéries (Ramos *et al.*, 2020).

Somados, os diversos aspectos morfológicos, anatômicos e fisiológicos conferem ao bioma características climáticas marcantes, com apenas duas estações definidas na maior parte de sua extensão: uma estação bem seca, com longos períodos de estiagem, que começa

em maio e perdura até setembro e uma chuvosa, que se inicia em outubro e vai até abril (Lacerda; Mapeli, 2021; Lima *et al.*, 2020).

Os solos do Cerrado são altamente lixiviados, deficientes em nutrientes, ácidos e com altas concentrações de alumínio. Suas temperaturas anuais ficam em torno dos 24°C. No entanto, na primavera-verão pode alcançar 40°C, com verão úmido e inverno seco. Essas variações sazonais das condições climáticas influenciam no manejo das plantações (Santos; França, 2018). Tais informações podem ser visualizadas na Figura 1.

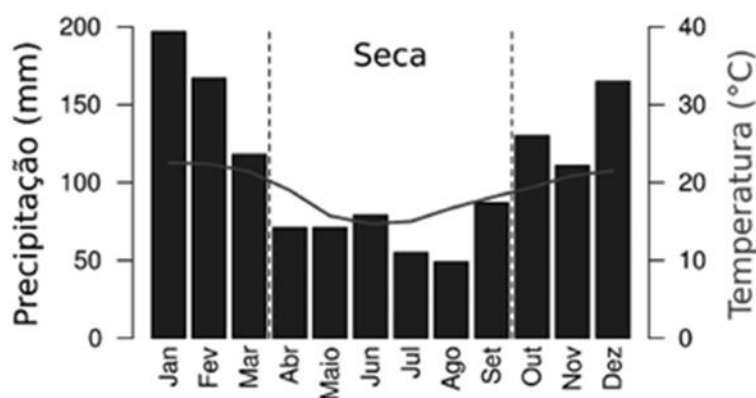


Figura 1 - Climatografia anual do Cerrado.

Fonte: Adaptado de Santos; França p. 46 (2018).

2.3. A produção da cana-de-açúcar

Ao longo dos séculos, a cana-de-açúcar se tornou uma cultura de significativa importância econômica e industrial, sendo cultivada para a produção diversificada de açúcar, etanol, bagaço utilizado como fonte de energia e matéria-prima para diversos processos industriais, além de servir como forragem na alimentação animal, entre outros usos (Fernandes, 2020).

A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO, 2024) e a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA, 2025) listam o Brasil como o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com área plantada de mais de 8,2 milhões de hectares e o aponta como um dos maiores consolidadores no uso do etanol como alternativa do uso dos combustíveis fósseis.

A Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024) constatou que a safra 24/25 foi de 696,96 milhões de toneladas, com 5,1% de redução em comparação com o biênio

passado. A região Sudeste segue como a maior produtora, atingindo a marca de 439,6 milhões de toneladas plantadas numa área de 5,48 milhões de hectares com uma estimativa de 80.181 kg/ha. Com isso, a produção de açúcar e etanol sofrerá perdas de 3,4% para o açúcar, esperando cerca de 44,1 milhões de toneladas e para o etanol, uma alta de 4,4%, totalizando 37,2 bilhões de litros.

O estado de Minas Gerais é o terceiro maior produtor de cana-de-açúcar do Brasil, produzindo cerca de 11% da produção nacional (CONAB, 2025). De acordo com a Associação das Indústrias Sucroenergéticas de Minas Gerais (SIAMIG, 2025) a safra de 24/25 processou em suas usinas cerca de 82 milhões de toneladas e a produção de etanol alcançou a marca de 3,3 bilhões de litros.

A Figura 2 mostra que houve aumento da produção de cana-de-açúcar nos últimos biênios, sem alteração significativa na área cultivada, sugerindo uma elevação na produtividade das áreas dedicadas ao cultivo da cana, reafirmando que houve mudanças significativas no setor sucroalcooleiro, com impactos na governança e na organização da cadeia produtiva, onde-se produz mais com menos área.

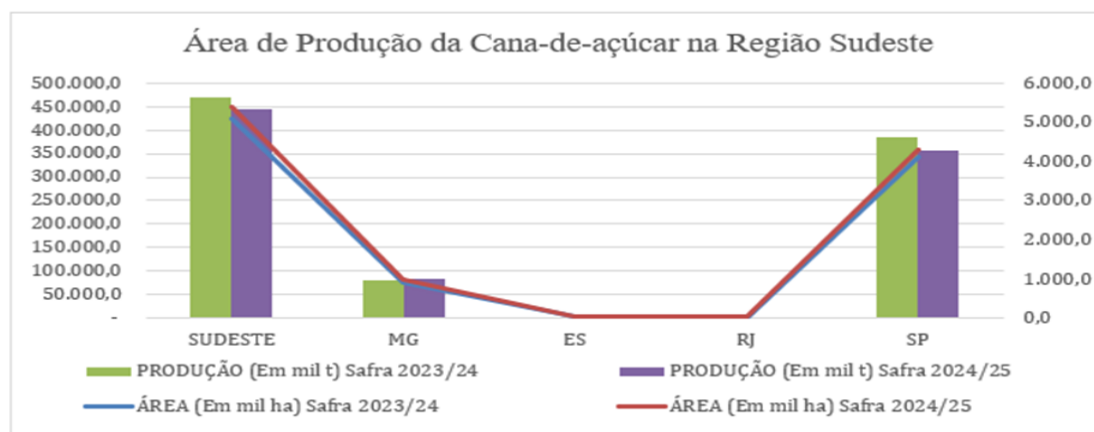


Figura 2 – Área de produção da cana-de-açúcar na região Sudeste, safra 22/23 e 24/25.
Fonte: Adaptado CONAB, 2024.

A qualidade agrícola da cana-de-açúcar é um tema amplamente discutido devido à sua importância. A eficiência fotossintética, sua capacidade de produzir uma variedade de derivados, como etanol, açúcar, papel, cosméticos, subprodutos (vinhaça, torta de filtro, palha e bagaço), bioeletricidade, matéria-prima para diversos setores, tornando-a um recurso versátil e valioso para a economia global e, por isso, tem alta relevância nos aspectos social, econômico e ambiental do Brasil (Feltre; Perosa, 2020).

A produção de etanol como fonte de energia renovável e sua contribuição para a redução da emissão de gases de efeito estufa deve ser levada em consideração, pois o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar é considerado uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis, promovendo a diversificação da matriz energética e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. A produção de etanol a partir da cana-de-açúcar representa não apenas uma oportunidade econômica para o setor sucroalcooleiro, mas também um avanço significativo em direção a uma economia mais verde e sustentável (Pereira; Cavichioli, 2021).

2.4. Vinhaça: um subproduto e alternativa na fertirrigação localizada

A vinhaça é um subproduto gerado no processo de destilação após a fermentação de diferentes fontes de materiais sacarídeos, amiláceos e lignocelulósicos. Com composição química variável, a vinhaça é caracterizada por sua cor escura, pH baixo, alta concentração de compostos orgânicos e salinidade. A disposição adequada da vinhaça no solo é essencial devido ao seu volume de produção e características peculiares, sendo comum sua aplicação como fertilizante nos campos de cana-de-açúcar devido ao seu teor de matéria orgânica e nutrientes (Naspolini *et al.*, 2017).

Na produção de etanol (Figura 3), cada litro produzido gera de 10 a 15 litros de vinhaça. É um subproduto que sai em elevada temperatura dos destiladores, fluida, turva, ácida, de odor desagradável, possui potencial poluidor maior que o esgoto doméstico, com alta demanda química e bioquímica de oxigênio (Nascimento Júnior *et al.*, 2017; Baptista; Coneglian, 2020).



Figura 3 – Fluxograma do processo de produção do etanol e açúcar.

Fonte: Adaptado Viana; Costa, 2022.

Na Tabela 1 estão detalhados os principais componentes da vinhaça, antes de receber qualquer tipo de tratamento para ser destinada a um fim específico. A vinhaça possui altas concentrações de nitrogênio, potássio e fósforo disponíveis em suas formas orgânicas e, para serem assimilados pelas plantas, é necessário que ocorra a sua disponibilização em formas mineralizadas (Silva *et al.*, 2023).

Tabela 1 – Composição química da vinhaça.

Composição	Valores
pH	4,20 a 4,70
Condutividade elétrica (dS m ⁻¹)	0,15
Carbono (mg L ⁻¹)	1032,5
Nitrogênio total (mg L ⁻¹)	51,80
Fosfato total (mg L ⁻¹)	6,78
Cálcio (mg L ⁻¹)	838,30
Magnésio (mg L ⁻¹)	395,30
Sódio (mg L ⁻¹)	729,10
Potássio (mg L ⁻¹)	1053,00

Fonte: Costa *et al.*, 2021.

Estes compostos fazem da vinhaça um fertilizante líquido que traz muitos benefícios, como: abastecimento hídrico da lavoura; redução no uso de fertilizantes; redução da poluição ambiental que a vinhaça poderia causar se não fosse destinada de forma correta; aumento da produtividade canavieira quando aplicadas doses controladas (Costa *et al.*, 2021).

O Brasil utiliza quase toda a vinhaça produzida em suas usinas na fertirrigação dos canaviais, com a intenção de reaproveitar os nutrientes presentes (Wheeler *et al.*, 2021). Por conter altas doses de compostos orgânicos de alto peso molecular, ácidos orgânicos, aminoácidos e nutrientes (P, K e Ca). Ela melhora a qualidade do solo, no entanto, se a dose for excessiva, a vinhaça pode trazer sérios problemas ao meio ambiente, tais como: acidificação e salinização extrema do solo, presença de insetos pelo odor fétido, redução dos teores de oxigenação, inibição da germinação de mudas, eutrofização de corpos hídricos próximos as lavouras, contaminação de águas subterrâneas. Além disso, o custo de transporte até a lavoura é extremamente elevado, uma vez que é realizado por meio de canais escavados

(este método é necessário devido à inviabilidade de deslocamento por tubulações e bombas, em virtude da alta viscosidade do material) (Eng Sánchez *et al.*, 2021; Marafon *et al.*, 2019).

O Conselho Estadual de Política Ambiental - COPAM (2011) define o que é a vinhaça, estabelece as normas para armazenamento dos efluentes das usinas de açúcar e destilarias de álcool, determina a proibição do despejo em corpos hídricos sem tratamento, regula a quantidade de vinhaça a ser aplicada em campos agricultáveis, impondo limites com intuito de evitar desequilíbrios ecossistêmicos severos. Essa norma exige que seu uso seja feito com doses controladas e monitoramento constante, devido ao seu potencial poluidor, que pode causar prejuízos graves ao ambiente. Essa legislação alia o aproveitamento sustentável da vinhaça com a proteção ambiental do solo, águas superficiais e subterrâneas.

Além disso, o COPAM (2011) solicita que os produtores que optam por utilizar a fertirrigação como manejo de fertilização do solo, apresentem anualmente laudos e relatórios técnicos nos quais constem informações referentes a caracterização do solo quanto aos atributos físico-químicos e biológicos (pH, teores de matéria orgânica, cálcio, magnésio, potássio, sódio, sulfato, capacidade de troca catiônica, ou CTC e, saturação por bases) em camadas de 0-20 e 20-40 cm do solo.

O COPAM (2011) também estabelece o limite de concentração máximo de potássio no solo de 6% da CTC_{potencial}; o que se for passado, a aplicação fica restrita a 185 kg/há de K₂O/ha. Esse valor pode ser calculado a partir da seguinte fórmula:

$$D : \frac{[(CTC_{\text{potencial}} * 94) + 185]}{TK}$$

TK

Em que:

D: dose da vinhaça (em m³/ha);

CTC_{potencial}: capacidade de troca catiônica, obtida pela análise do solo; potencial do solo a pH 7 (cmolc/dm³);

94: fator obtido considerando 5% da CTC_{potencial} e uma profundidade de solo de 40 cm;

185: capacidade de extração da cana-de-açúcar (K₂O, em kg/ha), obtido considerando produtividade média do corte de cana soca (cerca de 80t/ha) e extração média de K₂O de 2,33 kg/t cana-de-açúcar;

TK: teor de K₂O da vinhaça (kg/m³)

O repasse desses dados ao Órgão Ambiental se dá geralmente no início de cada safra, juntamente com o Plano de Aplicação da vinhaça, das águas residuárias ou sua mistura em solo agrícola, para controle e fiscalização das aplicações em lavouras.

A partir dessas especificações legislativas, há uma evolução no entendimento dos benefícios do uso e aplicação da vinhaça nas plantações de cana-de-açúcar refletindo uma mudança de perspectiva ao longo do tempo. Inicialmente considerada uma prática consolidada e atrativa para a melhoria da fertilidade do solo, a fertirrigação com vinhaça *in natura* enfrentou desafios relacionados a impactos ambientais, como emissões de gases de efeito estufa e potencial poluidor. A introdução de alternativas, como a digestão anaeróbica, destacou a necessidade de buscar soluções mais sustentáveis para o manejo da vinhaça, visando maximizar a recuperação de recursos e minimizar os impactos negativos. A análise econômica ressaltou a importância de equilibrar os benefícios econômicos com os custos ambientais, evidenciando a complexidade envolvida na escolha das estratégias de aplicação da vinhaça nas plantações de cana-de-açúcar (Fuess *et al.*, 2021).

A vinhaça é frequentemente aplicada em área total sobre o solo, por meio de canhões aspersores. Esse método, embora forneça nutrientes para as plantas, pode resultar em perdas significativas de nutrientes devido à lixiviação e volatilização, além de potencialmente contribuir para a poluição de corpos d'água próximos, devido ao escoamento superficial (Bettio *et al.*, 2021).

Por outro lado, a fertirrigação localizada com vinhaça envolve a aplicação precisa desse subproduto diretamente nas soqueiras, utilizando tanques de fibra de vidro tracionados por tratores, que permitem a aplicação da vinhaça de forma localizada na linha da cana e na quantidade correta. Essa abordagem permite uma distribuição mais eficiente e direcionada dos nutrientes contidos na vinhaça, reduzindo o desperdício e maximizando a absorção pelas plantas. Além disso, a aplicação localizada minimiza os impactos ambientais negativos, como a lixiviação de nutrientes e a contaminação de recursos hídricos, ao mesmo tempo em que melhora as propriedades do solo de forma mais eficaz. Assim, a fertirrigação localizada é uma prática agrícola mais sustentável e eficiente, capaz de promover o aumento da produtividade enquanto minimiza os impactos ambientais negativos associados à aplicação convencional de vinhaça (Berilli *et al.*, 2022).

2.5. Microrganismos e sua relação com o solo

Presentes em todos os ambientes do planeta, os microrganismos suportam os mais variados tipos de clima, concentrações e temperaturas que, na maioria das vezes, se faz necessária para se multiplicarem. Os solos ostentam a maior quantidade e diversidade bacteriana e fúngica, se comparado ao ar e à água, pois geralmente neste tipo de ambiente existe maior disponibilidade de substratos e nutrientes (Bald *et al.*, 2021; Rocha *et al.*, 2022).

A Figura 4 mostra os principais tipos de microrganismos e componentes do solo e como este sistema se estrutura normalmente.

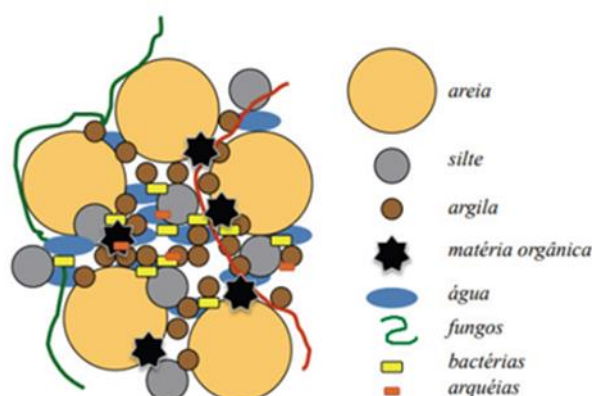


Figura 4 - Esquema da estrutura, composição e organização de agregado do solo.

Fonte: Bald *et al.* (2021).

A microbiota do solo é responsável por diversas funções, das quais podem ser destacadas: degradação da matéria orgânica, síntese e participação dos ciclos biogeoquímicos (N, P, C e S), síntese e reciclagem dos nutrientes e deslocamento de energia nestes microambientes. É composta por cinco grupos distintos, que estão presentes em grande quantidade e diversidade de espécies: bactérias, actinomicetos, fungos, algas e protozoários (Ferreira *et al.*, 2017).

Conhecer a microbiota local é de grande importância em se tratando de qualidade do solo, considerando também outros fatores como a atividade enzimática, taxa de respiração e biomassa microbiana, os quais auxiliam na avaliação das práticas agrícolas adotadas naquele local (Silva *et al.*, 2021).

Os estados fisiológicos das células microbianas têm um impacto significativo na respiração do solo, assim, fatores como: umidade, temperatura, estrutura e textura do solo, quantidade de matéria orgânica pode auxiliar na atividade microbiana do solo. Essas

variáveis oferecem uma compreensão das atividades microbiológicas no decorrer do desenvolvimento de culturas (Pinto *et al.*, 2022).

A microbiota local, juntamente com as raízes das plantas e os animais do solo, desempenha papel fundamental na ciclagem de nutrientes, participando dos processos biogeoquímicos. As enzimas microbianas catalisam as reações metabólicas que desempenham funções na decomposição de resíduos orgânicos, auxiliam na ciclagem de nutrientes e na formação da matéria orgânica e estrutura dos solos (Hyeda, 2020).

Enzimas como a desidrogenase são indicadoras de qualidade de solo, sendo extremamente sensíveis às mais diversas alterações no ambiente, refletindo na atividade oxidativa total da microbiota em estado livre no solo. Essa atividade enzimática é indicativa das atividades biológicas do solo e pode fornecer informação sobre a saúde e a qualidade do solo (Chaer *et al.*, 2023).

Indicadores físicos e químicos são essenciais também para avaliar a qualidade do solo, dentre eles: pH, carbono orgânico, capacidade de troca de cátions, nitrogênio, fósforo e potássio, estes, fundamentais para o crescimento das plantas. Esses elementos são muito importantes para o desenvolvimento de culturas, pois suas propriedades químicas afetam diretamente as relações solo-planta, a qualidade da água, a disponibilidade de nutrientes e água para as plantas e outros organismos vivos (Mendes *et al.*, 2015).

Recentemente na adubação orgânica foi redescoberta sua capacidade de reposição de nutrientes e auxílio na realização dos ciclos biogeoquímicos, fornecendo matéria orgânica para a microbiota degradar. Essa adubação, além de fortalecer e aumentar o desempenho da biomassa microbiana do solo, contribui na liberação de nutrientes para as plantas e melhora a decomposição dos resíduos (Santos *et al.*, 2020).

Portanto, é importante compreender como estes microrganismos atuam na catálise de substâncias de alta massa molecular e na disponibilização da matéria orgânica presente no ambiente, permitindo a captação de nutrientes por outros seres vivos (Zago *et al.*, 2017).

2.6. Metabolômica da cana-de-açúcar e suas aplicações

A cana-de-açúcar, reconhecida por alta eficiência fotossintética e rápido crescimento por se tratar de uma gramínea, possui grande relevância econômica e ambiental. Por isso, o desenvolvimento de variedades mais produtivas e eficientes que necessitem de menos uso de

água e nutrientes, por meio de avanços biotecnológicos, com ênfase em pesquisas voltadas em variedades tolerantes à seca ganham destaque, buscando aumentar a resiliência e a eficiência da cana-de-açúcar. Essa abordagem visa garantir que a cultura continue sendo recurso estratégico e sustentável para a economia e uso de fontes renováveis de combustíveis. (Pereira; Cavichioli, 2021).

Como exemplo de variedade de cana-de-açúcar a CTC 9002 apresenta várias características importantes que aumentam a viabilidade, adaptabilidade agrícola, tolerância a herbicidas, sem efeitos fitotóxicos significativos (característica diferenciada para manter a saúde das culturas e melhorar o potencial de rendimento em ambientes competitivos), potencial de rendimento e qualidade de processamento na região do Cerrado de Minas Gerais (Ferreira *et al.*, 2017). A CTC 9002 é conhecida pelo seu rápido desenvolvimento, incluindo altura significativa do colmo e comprimento do internódio, contribuindo para maior rendimento de cana e seus teores de brix e sacarose atendam às demandas da indústria (Tawadare *et al.*, 2019; Dias; Silva, 2020).

Com a crescente demanda por fontes renováveis de energia, o plantio de cana-de-açúcar foi sendo cada vez mais priorizado, otimizando os sistemas produtivos, buscando seleção de cultivares adaptadas a cada tipo de ambiente em que são plantadas. O desempenho e o alto rendimento dessas variedades não dependem apenas do seu material genético, mas também da implementação de insumos e práticas culturais adequadas, como fertilização e irrigação. A quantificação dos nutrientes absorvidos durante seu crescimento e colheita é crucial para determinar a reposição necessária, influenciando as recomendações para ciclos futuros. No cultivo da cana-de-açúcar, é importante considerar a idade da lavoura, diferenciando a cana-planta da cana-soca (Cintra *et al.*, 2020).

O metaboloma é o conjunto de metabólitos presentes em organismo em determinado momento, geralmente analisados em períodos antes da colheita da cultura. Os metabólitos são moléculas que desempenham papéis essenciais nos processos metabólicos, como intermediários de vias metabólicas, sinais de comunicação celular, e compostos envolvidos na defesa contra estresses ambientais. O estudo do metaboloma, conhecido como metabolômica, busca analisar qualitativa e quantitativamente essas moléculas para compreender melhor os processos biológicos e as respostas dos organismos a diferentes condições, como estresse, doenças, interações ecológicas, entre outros (Sabino, 2017).

A biometria é uma outra área da ciência que se dedica à medição e análise de características físicas e comportamentais de seres vivos. No contexto das plantas, como a cana-de-açúcar, a biometria envolve a medição quantitativa de diversas variáveis, como altura da planta, número de folhas, diâmetro do colmo, entre outros atributos morfológicos. Essas avaliações biométricas são essenciais para compreender o desenvolvimento, crescimento e maturação das plantas, fornecendo informações valiosas para o manejo adequado das culturas agrícolas (Roviero *et al.*, 2023).

Devido à relevância na produção de matéria-prima e papel crucial na economia, a cana-de-açúcar enfrenta desafios crescentes que exigem manejos mais eficazes e cada vez mais sustentáveis. Investir em variedades mais produtivas e resistentes a pragas por meio da biotecnologia é fundamental para assegurar a adaptabilidade e eficiência no uso de recursos dessas culturas (Inada, 2016). Ao analisar o metaboloma, obtém-se respostas biológicas dessas plantas, incluindo estresses ambientais e interações ecológicas, enquanto a biometria fornece dados quantitativos sobre características físicas da planta, como altura e diâmetro do colmo, fundamentais para compreender o desenvolvimento e crescimento da cultura. Integrando essas abordagens, a pesquisa agrônômica pode otimizar a produtividade e a sustentabilidade da cana-de-açúcar, destacando a importância da correlação desses dois fatores para fornecer dados concisos sobre o que organismo estudado absorveu durante seu período de desenvolvimento (Chinelato, 2016; Sabino, 2017; Arcoverde; Santos, 2020).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMADA, E. D. B.; SOUSA, A. E. C.; SOARES, F. A. L. Vinasse application management on two sugarcane varieties in the cerrado goiano. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 34, n. 1, p. 39-49, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252021v34n105rc>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rcaat/a/BSDLWLDgSqTvHXg9tqxntZw/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 03 fev 2024.

ALVES, S. M. DE J.; FURTADO, A. C.; SOUZA, J. C. Dinâmica do agronegócio e a supressão da vegetação de cerrado no município de Quirinópolis/Goiás. **Élisée, Revista de Geografia da UEG**, v. 12, n. 1, p. 1-17, 2023. DOI:10.31668/elisee.v12i01.13677. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/373155952_Dinamica_do_agronegocio_e_a_supressao_da_vegetacao_de_cerrado_no_municipio_de_QuirinopolisGoias. Acesso em: 25 jul 2023.

ANDRADE, A. F. **Dinâmica de potássio no sistema solo-planta em cana-soca sob condições edafoclimáticas de cerrado, Goiânia, GO**. Orientador: Rilner Alves Flores. 2018. 88p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás, Goiás – GO. 2018. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/items/0db15a86-6d7e-4c86-986c-2e4550d9fbcf>. Acesso em: 04 fev 2024.

ARAÚJO, D. F. C. DE; SOBRINHO, F. L. A. Análise do impacto social da mecanização da colheita de cana-de-açúcar no Triângulo Mineiro. **Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros**, Três Lagoas, v. 1, n. 34, p. 13-48, 2021. DOI: <https://doi.org/10.55028/agb-tl.v1i34.12886>
Disponível em: <https://periodicos.ufms.br/index.php/RevAGB/article/view/12886/10171>. Acesso em: 25 jun 2023.

ARCOVERDE, S. N. S.; DE SOUZA, C. M. A.; NAGAHAMA, H. DE J.; SANTOS, W. R. Biometria de diferentes variedades de cana cultivada em sistema plantio direto e preparo reduzido. **Energia na Agricultura**, v. 35, n. 2, p. 199-213, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.17224/EnergAgric.2020v35n2p199-213>. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/3115>. Acesso em: 26 fev 2025.

BALD, D. R.; RANGEL, C. P.; VARGAS, A.; GIRÃO, K. T.; PASSAGLIA, L. M. P. Microbiota do solo: a diversidade invisível e a sua importância. **Bio Diverso**, Porto Alegre, v. 1, n. 1, p. 101-131, 2021. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/biodiverso/article/view/120742/65552>. Acesso em: 30 ago 2023.

BAPTISTA, E. K. R.; CONEGLIAN, C. M. R. Tratamento biológico da vinhaça com a adição de aditivo biológico. In: XXVIII CONGRESSO VIRTUAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNICAMP, 2020, Limeira. **Anais [...]**. Limeira: Faculdade de Tecnologia – FT– campus I de Limeira, p. 1-5, 2020. Disponível em: <https://www.prp.unicamp.br/inscricao-congresso/resumos/2020P17517A35312O251.pdf>. Acesso em: 20 jul 2023.

BERILLI, S. S.; PAZINATO, M. F.; PIROVANI, C. H. D.; TORREZANI, S. P.; PEREIRA, L. L.; BERILLI, A. P. C. G. Application of biofertilizer directly on ‘Terra Maranhão’ platatin bunch for productivity gain. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 44, n. 1, p. 1-7, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-29452022964>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbf/a/CZv5HDptSXpszPkNf8qSyjD/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 01 ago 2023.

BETTIO, I.; SCHALLEMBERGER, J. B.; LAZZARETTI, G.; PAVEGLIO, S. S.; ROSA, M. M.; ROSA, J. R. P. Impacto da fertirrigação com vinhaça nas propriedades químicas e microbiológicas de solos. **Revista Aidis de Ingeniería Y Ciencias Ambientales**, v. 14, n. 2, p.578-593, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2021.14.2.72006>. Disponível em: <https://repositorio.unam.mx/contenidos/impacto-da-fertirrigacao-com-vinhaca-nas-propriedades-quimicas-e-microbiologicas-de-solos->

4137909?c=pKZxPB&d=false&q=%E2%80%9CP&i=1&v=1&t=search_0&as=0. Acesso em: 06 out 2023.

BIOTROP, Biological Technology Solutions. **Artigo: Utilização da vinhaça com aplicação localizada nas linhas da cultura da cana-de-açúcar.** Vinhedo, 2022. Disponível em: <https://biotrop.com.br/utilizacao-da-vinhaca-com-aplicacao-localizada-nas-linhas-da-cultura-da-cana-de-acucar/>. Acesso em: 12 jan 2024.

CARPANEZ, T. G.; MOREIRA, V. R.; ASSIS, I. R.; AMARAL, M. C. S. Sugarcane vinasse as organo-mineral fertilizers feedstock: Opportunities and environmental risks. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 832, n. 154998, p. 1-14, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154998>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35390364/>. Acesso em: 07 fev 2025.

CHAER, G. M.; MENDES, I. C.; DANTAS, O. D.; MALAQUIAS, J. V.; REIS JUNIOR, F. B.; OLIVEIRA, M. I. L. Evaluating C trends in clayey Cerrado Oxisols using a four-quadrant model based on specific arylsulfatase and β -glucosidase activities. **Applied Soil Ecology**, [s. l.], n. 183, p. 1-11, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104742>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139322003584>. Acesso em: 04 abr 2024.

CHINELATO, P. H. **Produtividade e comportamento biométrico da cana-de-açúcar sob aplicação de vinhaça (*in natura*) e adubação mineral via gotejamento subsuperficial.** Piracicaba, SP. Orientador: Jarbas Honório de Miranda. 2016. 115p. Dissertação (Mestrado em Ciências, área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas). Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, São Paulo – SP. 2016. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11152/tde-10082016-144600/pt-br.php>. Acesso em: 05 jan 2025.

CINTRA, P.; MACHADO, R.; ARRIEL, F. H.; OLIVEIRA, H. F. E.; LOUREIRO, F. A. S.; OLIVEIRA, A. P. S.; RABELO, K. C. C. Crescimento, qualidade industrial e balanço de nutrientes de cultivares de cana-de-açúcar sob adubação no Cerrado. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 9, n. 12, p. 1-26, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i12.11117>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/348043662_Crescimento_qualidade_industrial_e_balanco_de_nutrientes_de_cultivares_de_cana-de-acucar_sob_adubacao_no_Cerrado. Acesso em: 07 fev 2024.

CNA, Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. **Instituto CNA - Cana-de-açúcar: previsão de aumento na safra 2022/2023.** Brasília. 2025. Disponível em: <https://cnabrasil.org.br/noticias/cana-de-acucar-previsao-de-aumento-na-safra-2022-2023>. Acesso em: 04 jan. 2023.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **CONAB - Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar.** Brasília. 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5501-brasil-deve-atingir-recorde-na-producao->

de-acucar-mesmo-com-reducao-na-producao-de-cana-de-acucar-na-safra-2024-2025.
Acesso em: 04 jan. 2025.

COPAM, CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL. **Deliberação Normativa COPAM nº 184, de 13 de junho de 2013**. Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=27535>. Acesso em: 06 set 2024.

COSTA, M. S.; ROLIM, M. M.; SILVA, G. F. DA; SIMÕES NETO, D. E.; PEDROSA, E. M. R. Nutrient content and accumulation in sugarcane under mineral fertilization and high doses of vinasse. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 42, n. 2, p. 565-582, 2021. DOI: <https://10.5433/1679-0359.2021v42n2p565>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/350665620_Nutrient_content_and_accumulation_in_sugarcane_under_mineral_fertilization_and_high_doses_of_vinasse. Acesso em: 10 jul 2023.

DIAS, J. P. T.; SILVA, M. A. Effect in greenhouse of commercial biostimulant on sugarcane seedlings growth. **Biotecnología Vegetal**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 23-31, 2020. Disponível em: <http://scielo.sld.cu/pdf/bvg/v20n1/2074-8647-bvg-20-01-23.pdf>. Acesso em: 12 mai 2024.

DUARTE, T. E. P. N.; LEITE, L. B. Cidades médias no cerrado brasileiro: desafios para a conservação da biodiversidade. **Terr@ Plural**, [s. l.], v. 14, p. 1–7, 2019. DOI: <https://10.5212/TerraPlural.v.14.2013420.006>. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/tp/article/view/13420/209209212788>. Acesso em: 21 set 2023.

ENG SÁNCHEZ, F.; TADEU, L.; CAVALCANTE, G. S.; ADORNO, M. A. T.; ZAIAT, M. Value-added soluble metabolite production from sugarcane vinasse within the carboxylate platform: An application of the anaerobic biorefinery beyond biogas production. **Fuel**, [s. l.], v. 286, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119378>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236120323747>. Acesso em: 28 jan 2024.

FAO, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAO - Food Outlook: biannual report on global food markets**. Rome/ Italy, FAO, 2024. Disponível em: https://www.undp.org/facs?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwsPCyBhD4ARIsAPaaRf3EF_hUf9rWbeGX1_qDdkniS-mV_yVBVKh_CV0mxlL3kBNRQt2zWAMaAks_EALw_wcB. Acesso em: 05 mai 2023.

FELTRE, C.; PEROSA, B. B. Governança no setor sucroalcooleiro: uma análise comparada de São Paulo e do Cerrado Mineiro e Goiano. **Revista Economia Ensaios**, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, v. 35, n. 2, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14393/REE-v35n2a2020-57244>. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistaeconomiaensaios/article/view/57244>. Acesso em: 10 ago 2023.

FERNANDES, M. G.; OLIVEIRA, A. H. Contaminação do solo por vinhaça: uma revisão dos impactos causados pela fertirrigação. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, v. 16, n. 7, p. 5394-5400, 2023. DOI: 10.55905/revconv.16n.7-067. Disponível em: <https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/1148>. Acesso em: 04 abr 2024.

FERNANDES, M. S. **Avaliação do impacto da aplicação de produtos químicos e nutricionais junto ao solo e corpos hídricos em uma lavoura de cana-de-açúcar situada no interior de Minas Gerais. Ribeirão Preto, SP.** Orientador: Luciano Farias de Novaes. 2020. 88p. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental) - Universidade de Ribeirão Preto, São Paulo – SP. 2020. Disponível em: <https://www.unaerp.br/infraestrutura/biblioteca/acervos>. Acesso em: 03 mar 2023.

FERREIRA, E. P. DE B.; STONE, L. F.; MARTIN-DIDONET, C. C. G. População e atividade microbiana do solo em sistema agroecológico de produção. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 48, n. 1, p. 22-31, 2017. DOI: <https://10.5935/1806-6690.20170003>. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/151815/1/CNPAF-2017-rca.pdf>. Acesso em: 26 nov 2023.

FORTINI, R. M., BRAGA, M. J., & FREITAS, C. O. Impacto das práticas agrícolas conservacionistas na produtividade da terra e no lucro dos estabelecimentos agropecuários brasileiros. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, [s. l.], v. 58, n. 2, p. 1-19, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2020.199479>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/resr/a/YKpKxKzvwyGgHfVW3qt4ZL/>. Acesso em: 02 dez 2023.

FUESS, L. T.; ALTOÉ, M. E.; FELIPE, M. C.; GARCIA, M. L. Pros and cons of fertirrigation with in natura sugarcane vinasse: Do improvements in soil fertility offset environmental and bioenergy losses? **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], n. 319, p. 1-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128684>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621028845>. Acesso em: 02 mar 2024.

GERLACH, L. F. R. **Atividade enzimática de solo e sua relação com sistemas de plantas de cobertura em período outonal. Santa Maria, RS.** Orientador: Antônio Luís Santi. 2022. 64p. Dissertação (Mestrado em Agricultura de Precisão, Área de Concentração em Manejo de sítio específico de solo e planta) – Universidade de Santa Maria, Rio Grande do Sul – RS. 2022. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/26036/DIS_PPGAP_2022_%20GERLACH_LUIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 10 set 2023.

HYEDA, D. **Atributos microbiológicos como indicadores de qualidade do solo em plantio de eucalipto com aplicação de biochar. Ponta Grossa, PR.** Orientadora: Carolina Weigert Galvão. 2020. 71p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Paraná – PR. 2020. Disponível em: <https://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/3159>. Acesso em: 23 fev 2024.

INADA, D. T. **Análise do metaboloma e do transcrito da cana-de-açúcar ao longo do ciclo de maturação da planta. São Paulo, SP.** Orientadora: Gláucia Mendes Souza. 2016. 110p. Dissertação (Mestrado em Bioinformática) – Universidade de São Paulo, São Paulo – SP. 2016. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/95/95131/tde-20230725-114608/publico/InadaDaviToshio.pdf>. Acesso em: 31 ago 2024.

LACERDA, V. O.; MAPELI, A. M. Efeitos da sazonalidade sobre a fenologia e a fisiologia de *Parkia platycephala* Benth (Fabaceae, Caesalpinioideae) em área de Cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, [s. l.], v. 31, n. 3, p. 1344-1363, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509839111>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/3vwhppwBtBtTkHN8KxDwTCB/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 14 jun 2023.

LIMA, C. DE S.; DALZUCHIO, M. S.; DA SILVA, E. F.; PÉRICO, E. Macrofauna edáfica e sua relação com sazonalidade em sistema de uso do solo, bioma cerrado. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 1-13, 2020. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.002.0001>. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/CBPC2179-6858.2020.002.0001/1926>. Acesso em: 08 ago 2023.

MAPBIOMAS, Plataforma MapBiomias. **MapBiomias – Infográficos dos dados de uso e cobertura da terra do Brasil e de cada bioma da Coleção 7.1 do MapBiomias**, 2025. Disponível em: <http://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/Infograficos/Cole%C3%A7%C3%A3o%207.1/MBI-Infograficos-7.1-cerrado-BR.jpg>. Acesso em: 09 jun. 2023.

MARAFON, A. C.; SALOMÃO, K. R.; AMORIM, E. L. C.; PEITER, F. S. Use of sugarcane vinasse to biogas, bioenergy, and biofertilizer production. **Elsevier Inc**, [s. l.], p. 179-194, 2019. DOI: <https://10.1016/B978-0-12-814236-3.00010-X>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/338316704_Use_of_sugarcane_vinasse_to_biogas_bioenergy_and_biofertilizer_production. Acesso em: 22 jul 2023.

MARANHÃO, D. D. C.; AGUADO, O. I. DE O.; PEREIRA, M. G.; ARAÚJO, A. P.; CASTRO, S. S. DE; FERREIRA JÚNIOR, L. G. Analysis of Potential for Linear Erosion in the Cerrado Biome Using Morphopedology. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, [s. l.], v. 41, p. 1-17, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20160427>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcS/a/pWTqQTP8WddSkkbhFBsqbBb/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 31 jul 2023.

MARTINS FILHO, J. B.; MENESES, K. C.; COUTINHO, R. S.; REINALDO, L. F.; PIRES, I. C. G.; FERRÃO, G. E. Perfil socioeconômico e práticas agrícolas de agricultores familiares no município de Chapadinha (MA). **Natural Resources**, [s. l.], v.9, n.1, p.1-10, 2019. DOI: <https://10.6008/CBPC2237-9290.2019.001.0001>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/335597979_Perfil_socioeconomico_e_praticas_agricolas_de_agricultores_familiares_no_municipio_de_Chapadinha_MA. Acesso em: 04 set 2023.

MENDES, I. C.; DE SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B. Bioindicadores de qualidade de solo: dos laboratórios de pesquisa para o campo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 32, n. 1/2, p. 185-203, 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.35977/0104-1096.cct2015.v32.23311>. Disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/138889/1/Bioindicadores-de-qualidade.pdf>. Acesso em: 29 fev 2023.

NASCIMENTO JÚNIOR, L. F.; SILVA, P. C.; BARBOSA, K. de P.; CAVALCANTE, T. J.; RODRIGUES, A. A.; VITAL, R. G. Propriedades físicas do solo cultivado com cana-de-açúcar sob aplicação de vinhaça. **Revista ESPACIOS**, [s. l.], v.38, n. 39, p. 22-32, 2017. Disponível em: <https://www.revistaespacios.com/a17v38n39/a17v38n39p22.pdf>. Acesso em: 06 mai 2023.

NASPOLINI, B. F.; MACHADO, A. C. O.; CRAVO JUNIOR, W. B.; FREIRE, D. M. G.; CAMMAROTA, M. C. Bioconversion of Sugarcane Vinasse into High-Added Value Products and Energy. **BioMed Research International**, [s. l.], v. 2017, p. 1-12, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/8986165>. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/bmri/2017/8986165/>. Acesso em: 01 mai 2024.

NOVAK, E.; CARVALHO, L. A.; SANTIAGO, E. F.; FERREIRA, F. S.; MAESTRE, M. R. Composição química do solo em diferentes condições ambientais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 31, n. 3, p. 1063-1085, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509828995>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/dDLtG9SCvbf9wq4C3M9q8QC/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 nov 2023.

ORMAY, P. S.; GUIMARÃES, S. L. Bioatividade enzimática do solo em áreas de sucessão agrícola no Cerrado Mato-Grossense. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, Curitiba, v.22, n.5, p. 01-23. 2024. DOI: <https://10.55905/oelv22n5-012>. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/4457>. Acesso em: 06 abr 2024.

PEREIRA, D. N.; CAVICHIOLI, F. A. A importância da qualidade no processo do plantio da cultura da cana-de-açúcar. **Interface Tecnológica**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 844-856, 2021. DOI: <https://doi.org/10.31510/inf.v18i2.1335>. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/1335>. Acesso em: 02 mai 2024.

PINTO, L. E. V.; CORDEIRO, C. F. DOS S.; DE ARAUJO, A. S. F.; DE ARAUJO, F. F. Vinasse improves soil quality and increases the yields of soybean, maize, and pasture. **Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering**, v. 26, n. 5, p. 335-340, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n5p335-340>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/JZg4XpsFzYvVrjfSvykfNrD/>. Acesso em: 03 nov 2023.

RAMOS, M. R.; UHLMANN, A.; JUSTEN, L.; FREIRE, T. M.; PANTA, D. A. DE S. Uso do solo e a estacionalidade climática afetam os atributos biológicos do solo? **Revista Agroecossistemas**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 178-200, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.18542/ragros.v12i1.7474>. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/agroecossistemas/article/view/7474>. Acesso em: 15 ago 2023.

ROCHA, A. F. B.; SIQUIEROLI, A. C. S.; SILVA, A. A.; CARNEIRO, A. M. L.; VASCONCELOS, B. N. F.; GONDIM, D. D. R. Indicadores de Qualidade do Solo em Sistemas Agroecológicos no Cerrado Mineiro. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 34, p. 1-14, 2022. DOI: <https://10.14393/SN-v34-2022-62940>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sn/a/4z37PgJ56mJ9fsnYksVXKPg/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 06 mai 2024.

ROVIERO, J. P.; FREITA, C. M.; FERREIRA, C. L. Biometria de variedades de cana-de-açúcar no ambiente de produção da FAEXP na UEMG unidade Ituiutaba-MG. In: Anais do Simpósio de Tecnologia Fatec Jaboticabal (SITEC-JB), 2023, Jaboticabal. **Anais [...]**. Jaboticabal: Simpósio de Tecnologia Fatec Jaboticabal – Campus Jaboticabal, p. 13-18, 2023. DOI: <https://doi.org/10.52138/sitec.v13i1.318>. Disponível em: <https://publicacoes.fatecjaboticabal.edu.br/sitec/article/view/318>. Acesso em: 08 mai 2024.

SABINO, A. R. **O metaboloma da cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*) na resposta à herbivoria**. Maceió, AL. Orientador: Edson de Souza Bento. 2017. 140p. Tese (Doutorado em Química e Biotecnologia) – Universidade Federal de Alagoas, Alagoas – AL. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/1909>. Acesso em: 17 mai 2023.

SANO, E. E.; RODRIGUES, A. A.; MARTINS, E. S.; BETTIOL, G. M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; BEZERRA, A. S.; COUTO JR., A. F.; VASCONCELOS, V.; SCHULER, J.; BOLFE, E. L. Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 232, p. 818-828, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.108>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479718313732>. Acesso em: 11 set 2023.

SANTOS, G. M.; DE FRANÇA, L. R. **GEEA: Grupo de Estudos Estratégicos Amazônicos Tomo XI**. Editora INPA. Manaus, v. 11, p. 46, 2018.

SANTOS, T. E. B. DOS; SOUZA, A. G. V.; SILVA, K. D. DA; BUENO, L.L. Agricultura orgânica e a microbiota do solo. **Revista Agrotecnologia**, Ipameri, v. 11, n. 1, p. 95-102, 2020. Disponível em: <https://www.revista.ueg.br/index.php/agrotecnologia/article/view/9977>. Acesso em: 12 jan 2024.

SCHWAIDA, S. F.; CICERELLI, R., ALMEIDA, T, ROIG, H. L. Challenges and strategies on implementing an ecological corridor between protected areas in cerrado biome. **Revista Árvore**, v. 41, n. 6, p. 1-10, 2017.

DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-90882017000600011>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rarv/a/TtZWxnW4XSKmzFxRfWqBqxP/?lang=en>. Acesso em: 22 jun 2023.

SIAMIG, Associação das Indústrias Sucroenergéticas de Minas Gerais. **SIAMIG - Produção de cana-de-açúcar vai bater o recorde em Minas Gerais**. 2025. Disponível em: <https://diariodocomercio.com.br/agronegocio/producao-de-cana-de-acucar-vai-bater-o-recorde-em-minas-gerais/#gref>. Acessado em: 09 jan. 2023.

SILVA, H. S.; CHAVES, J. DA S.; DO NASCIMENTO, J. P. S.; DE MATOS; S. M.; NETO, A. F. DE B.; LEITE, J. L.; PEREIRA, H. R.; DE BRITO, W. A. Atividade microbiana no solo em sistema de produção consorciado. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 10, n. 14, p. 1-7, 2021. DOI: <https://10.33448/rsd-v10i14.22366>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/356249779_Atividade_microbiana_no_solo_em_sistema_de_producao_consorciado. Acesso em: 09 jan 2024.

SILVA, J. H. B. DA; ALMEIDA, L. J. M. DE; SILVA, E. DE S.; BARBOZA, J. B.; FARIAS, G. E. S.; DANTAS, É. DOS A.; SILVA, J. L. C. DA; SILVA, R. A. DA; SILVA, A. M. DA; CAVALCANTE, I. E.; BATISTA, A. M. A.; SILVA, A. V.; TOLEDO, L. C. M. Uso de vinhaça concentrada e enriquecida como biofertilizante na cana-de-açúcar: Uma revisão. **Scientific Electronic Archives**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 1-8, 2023. DOI: <https://10.36560/16220231651>. Disponível em: <https://sea.ufr.edu.br/index.php/SEA/article/view/1651>. Acesso em: 04 dez 2023.

SILVA, J. J.; DA SILVA, B. F.; STRADIOTTO, N. R.; PETROVIĆ, M.; GROS, M.; GAGO-FERRERO, P. Identification of organic contaminants in vinasse and in soil and groundwater from fertigated sugarcane crop areas using target and suspect screening strategies. **Science of the Total Environment**, v.761, n. 14323, p. 1-10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143237>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720367681>. Acesso em: 22 mai 2024.

SOBUCKI, L.; RAMOS, R. F.; MEIRELES, L. A.; ANTONIOLLI, Z. I.; JACQUES, R. J. S. Contribution of enzymes to soil quality and the evolution of research in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 45, p. 1-18, 2021. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20210109>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/KL9nNHnqyQHdVLBQGChSSNn/>. Acesso em: 05 abr 2023.

TAMBORIN, C. V.; SANTOS, R. J. A expansão do cultivo de cana de açúcar na microrregião de Uberaba e a produção de leite. **Observatorium: Revista Eletrônica de Geografia**, [s. l.], v. 11, n. 03, p. 78–107, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14393/OREG-v11-n03-2020-60850>. Disponível em:

<https://seer.ufu.br/index.php/Observatorium/article/view/60850/31566>. Acesso em: 05 set 2023

TAWADARE, R.; THANGADURAI, D.; KHANDAGAVE, R. B.; MUNDARAGI, A.; SANGEETHA, J. Phenotypic Characterization and genetic diversity of sugarcane varieties cultivated in northern Karnataka of India based on principal component and cluster analyses. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 62, n. 19180376, p. 1-12, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4324-2019180376>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/babt/a/7WPhtRmBf5DrR8GRSRNKjLv/>. Acesso em: 25 out 2024.

VERSIANI, N. F.; BAILEY, L. L.; PASQUALOTTO, N.; RODRIGUES, T. F.; PAOLINO, R. M. Protected areas and unpaved roads mediate habitat use of the giant anteater in anthropogenic landscapes. **Journal of Mammalogy**, [s. l.], v. 102, n. 3, p. 802–813, 2021. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyab004>. Disponível em: <https://academic.oup.com/jmammal/article/102/3/802/6143014>. Acesso em: 30 mar 2024.

VIANA, L. C. B.; COSTA, E. J. X. Fermentações etanólicas: construção de uma dorna Cleanferm para separação de partículas inorgânicas por meio de decantação em vinho levedado. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, [s. l.], v. 7, n. 09, p. 05-57.2022. DOI: [10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-quimica/fermentacoes-etanolicas](https://doi.org/10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-quimica/fermentacoes-etanolicas). Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-quimica/fermentacoes-etanolicas>. Acesso em: 24 fev 2024.

WHEELER, R. M.; CARGNIN, J. M. R.; DUTRA, A. R. DE A.; CUBAS, A. L. V.; MOECKE, E. H. S.; JOÃO, J. J. Potenciais aplicações da vinhaça da cana-de-açúcar visando a produção mais limpa: uma revisão integrativa. In: IX ENSUS – Encontro de Sustentabilidade em Projeto, 9, 2021, Florianópolis. **Anais [...]** Florianópolis: UFSC, 2021, p. 316-327. DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.25921230810>. Disponível em: <https://atenaeditora.com.br/catalogo/post/potenciais-aplicacoes-da-vinhaca-da-cana-de-acucar-visando-a-producao-mais-limpa-uma-revisao-integrativa>. Acesso em: 02 dez 2023.

ZAGO, L. M. S.; MOREIRA, A. K. O.; SILVA-NETO, C. M.; NABOUT, J. C.; FERREIRA, M. E.; CARAMORI, S. S. Biochemical activity in Brazilian Cerrado soils is differentially affected by perennial and annual crops. **Australian Journal of Crop Science**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 237–242, 2017. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.02.pne716>. Disponível em: https://www.cropj.com/zago_12_2_2018_235_242.pdf. Acesso em: 27 dez 2023.

CAPÍTULO 3 – APLICAÇÃO DA VINHAÇA LOCALIZADA: EFEITOS NOS ATRIBUTOS FÍSICO-QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO

RESUMO

A fertirrigação com vinhaça é uma prática agrícola que consiste na aplicação controlada desse subproduto orgânico no solo, fornecendo nutrientes e água para as plantas, melhorando a fertilidade do solo. A vinhaça gerada a partir da produção de etanol é rica em matéria orgânica e fonte de potássio, cálcio e outros elementos importantes para o desenvolvimento das lavouras. A utilização da fertirrigação localizada é uma técnica de manejo de uso recente que pode contribuir para redução da necessidade de irrigação e adubação química. Objetivo foi avaliar o efeito da fertirrigação com vinhaça localizada, sobre as propriedades físico-químicas e biológicas do solo com cultivo de cana-de-açúcar, ao longo das quatro estações do ano. Para a metodologia, foram conduzidos experimentos em campo em duas áreas com a variedade de cana CTC 9002, comparando solos com e sem aplicação de vinhaça durante quatro estações. A caracterização do solo incluiu análises físico-químicas, contagem de microrganismos e avaliação da atividade enzimática. Os resultados mostraram que a fertirrigação com vinhaça aumentou a retenção de água, a disponibilidade de macro e micronutrientes e a atividade microbiológica no solo, especialmente entre os microrganismos solubilizadores de potássio e fixadores de nitrogênio. Observou-se correlação positiva entre a aplicação de vinhaça e o aumento da atividade enzimática da desidrogenase, o que sugere uma melhoria nas condições do solo. Em resumo, a fertirrigação localizada de vinhaça mostrou-se benéfica tanto para as propriedades químicas quanto para os fatores biológicos do solo, contribuindo para agricultura mais sustentável ao reduzir a necessidade de fertilizantes químicos. Os resultados mostram a importância de ajustar as práticas de fertirrigação de acordo com as condições sazonais e as características específicas do solo para otimizar os benefícios desta técnica.

Palavras-Chaves: Cerrado. Enzima. Fertirrigação. Qualidade.

ABSTRACT

Fertigation with vinasse is an agricultural practice that involves the controlled application of this organic byproduct to the soil, supplying both nutrients and water to plants while enhancing soil fertility. Vinasse, a residue generated from ethanol production, is rich in organic matter and serves as a source of potassium, calcium, and other key elements essential for crop development. The use of localized fertigation is a relatively recent management technique that may help reduce the need for conventional irrigation and chemical fertilization. The objective of this study was to evaluate the effect of localized vinasse fertigation on the physical, chemical, and biological properties of soil cultivated with sugarcane across the four seasons of the year. Field experiments were conducted in two areas using the sugarcane variety CTC 9002, comparing soils with and without vinasse application over four seasons. Soil characterization involved physical and chemical analyses, microbial counts, and enzymatic activity assessments. The results showed that vinasse fertigation increased water retention, availability of macro and micronutrients, and microbial activity in the soil particularly among potassium-solubilizing and nitrogen-fixing microorganisms. A positive correlation was observed between vinasse application and the rise in dehydrogenase enzymatic activity, suggesting improved soil conditions. In summary, localized vinasse fertigation proved beneficial for both chemical and biological soil properties, contributing to more sustainable agriculture by reducing dependence on chemical fertilizers. The findings underscore the importance of adjusting fertigation practices according to seasonal variations and soil-specific characteristics to optimize the advantages of this technique.

Keywords: Cerrado. Enzymes. Fertigation. Quality.

1. INTRODUÇÃO

A cana de açúcar é uma cultura de grande importância econômica no Brasil, sendo essencial para a produção de biocombustíveis e açúcar. Utilizada como fonte renovável de energia e matéria-prima industrial destaca o Brasil globalmente. O aproveitamento de resíduos orgânicos, biofertilizantes e os subprodutos da cana (vinhaça, torta de filtro, bagaço e palha), promovem a sustentabilidade da cultura, aumentando a produtividade de forma eficiente e reduzindo insumos, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade agrícola (Pina *et al.*, 2015; Cintra *et al.*, 2020).

A vinhaça é um subproduto líquido resultante da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, sendo gerada em grande quantidade durante o processo de destilação. Sua composição varia bastante, mas geralmente contém altos teores de compostos orgânicos, N, P, K e outros nutrientes para as plantas, sendo sua aplicação uma prática comum na agricultura, visando melhorar a fertilidade do solo e fornecer nutrientes para as culturas, mais comumente a cana-de-açúcar. Nos últimos anos, com os avanços das pesquisas e com intenção de economizar na adubação e irrigação, surgiu a possibilidade da aplicação de vinhaça localizada, que aprimora a distribuição uniforme do subproduto nas linhas de cultivo, beneficiando uma área maior em comparação aos canhões aspersores. Este método melhora a homogeneização, reduzindo o impacto ambiental e a acidificação do solo, além de fornecer irrigação e nutrientes durante o ciclo da cana (Silva *et al.*, 2019).

A vinhaça pode trazer diversos benefícios quando aplicada na medida correta no solo, aumentando a disponibilidade de nutrientes para as plantas e a atividade microbiana. Além disso, pode contribuir para a redução da necessidade de adubação química, promovendo uma agricultura mais sustentável e econômica (Hoarau *et al.*, 2018).

A aplicação de vinhaça localizada na cana-de-açúcar pode revelar interações nos atributos do solo: como variações significativas nos teores de potássio, cálcio, magnésio e sódio, influenciando a condutividade elétrica e a absorção de sódio e elementos químicos pela planta e pelos microrganismos presentes. Tais interações evidenciam a importância da gestão adequada da vinhaça para a sustentabilidade do sistema agrícola, saúde da planta e balanço enzimático do ambiente (Costa *et al.*, 2023).

O presente trabalho objetivou avaliar o efeito da fertirrigação com vinhaça localizada, nas propriedades físico-químicas e biológicas do solo com cultivo de cana-de-açúcar, ao longo das quatro estações do ano.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Foi selecionada uma área de cultivo de cana soca da variedade CTC 9002 no município de Frutal-MG, onde uma área foi fertirrigada com vinhaça localizada (P1) localizada a -20,081293 de latitude sul e -49,193704 de longitude oeste possuindo um total de 21,15 ha (hectares) e outro ponto (P2) localizado a -20,069807 de latitude sul e -49,194761 de longitude oeste possuindo um total de 10 ha, servindo como controle, ambas áreas são formadas por Latossolo Vermelho distrófico típico. Todos os pontos possuem 1,5 m de espaçamento entre linhas no canavial.

A Figura 1 mostra os pontos no mapa da área experimental. A área destinada ao experimento estava em consórcio de plantação com o cultivo de soja há quatro anos, com um sistema de sucessão sem revolvimento do solo.

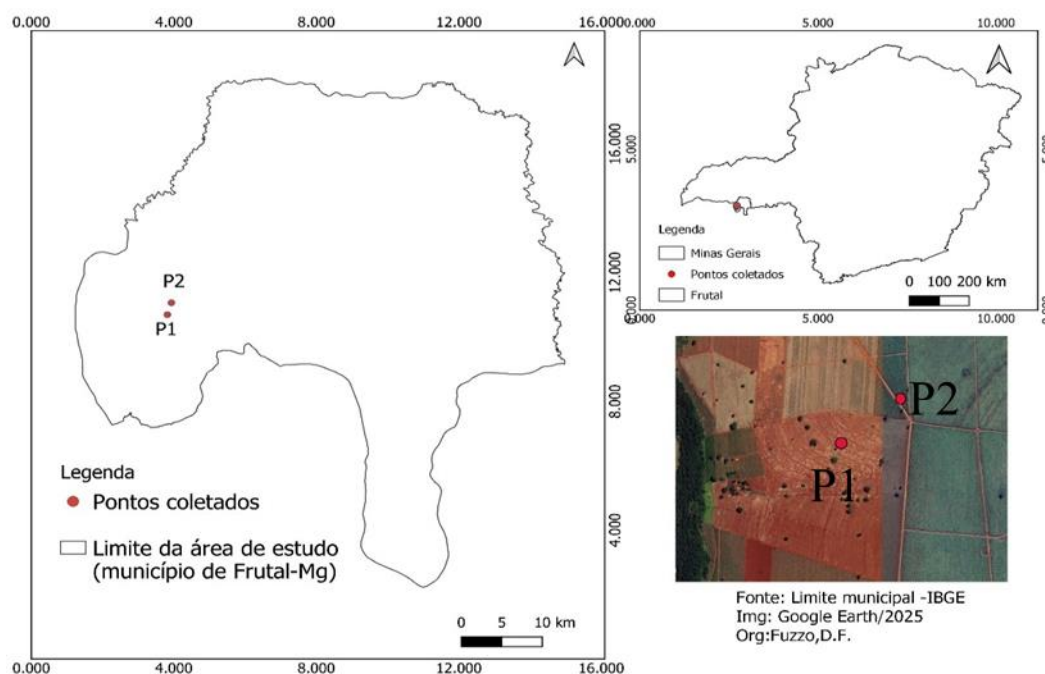


Figura 1 – Mapa de localização dos pontos demarcados para as áreas de pesquisa.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Foi utilizado o delineamento em blocos casualizados (DBC), no esquema fatorial 2x4 o primeiro fator foi constituído por dois tratamentos (controle e aplicação de vinhaça fertirrigada) na cana-de-açúcar e o outro fator correspondeu a quatro estações do ano, contendo assim 8 tratamentos com seis repetições e um total de 48 unidades experimentais.

Os pontos P1 e P2 passaram por 4 cortes e pela mesma cultura consorciada, soja (*Glycine max*), sendo que a cada colheita, os restos culturais foram utilizados como fonte de matéria orgânica para as próximas culturas.

Foram coletados solos em 6 pontos marcados em cada área, entre as plantas localizadas nas fileiras, a uma profundidade de 0-20 cm. As coletas foram realizadas no período de 12 meses a cada 85 dias, no fim de cada estação, compreendendo os meses de setembro de 2023 a agosto de 2024. As amostras foram encaminhadas para os laboratórios da Universidade do Estado de Minas Gerais, Unidade Frutal - MG (UEMG Frutal), na qual foram feitas as análises físico-químicas e biológicas.

As áreas do experimento nunca haviam passado por tratamento no solo, em todas as áreas sempre foram realizadas colheitas mecanizadas. Na Tabela 1 pode-se observar as doses de vinhaça e demais compostos que foram acrescidos no momento da fertirrigação localizada das áreas.

Tabela 1 – Dados sobre a fertirrigação localizada nas áreas de pesquisa.

Total da área de estudo em ha.	21,15
Volume de vinhaça aplicado em ha.	56,07
Vazão da vinhaça em ha.	8,58
Quantidade de N (kg/ha.)	29,70
Quantidade de K ₂ O (kg/ha.)	135
Ureia (20% do volume aplicado da vinhaça) em kg/ha.	11,21

Fonte: Elaboração própria, 2025.

2.1. Análises físico-químicas dos solos

Efetuuou-se o preparo da amostra, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA) e umidade gravimétrica. Em seguida, as análises de pH, capacidade de campo, condutividade elétrica e capacidade de campo (CC) adaptada (determinada pela retenção de água no solo pelo método

do psicrômetro). As análises foram todas realizadas em triplicata e conforme Teixeira *et al.* (2017).

2.1.1. Obtenção da TFSA (terra fina seca ao ar)

As amostras foram destorroadas manualmente e espalhadas sobre bandejas de papel kraft e colocadas em local seco e arejado, à sombra, até a completa dessecação ao ar.

2.1.2. Análise de umidade do solo

A determinação da umidade foi realizada conforme Teixeira *et al.* (2017). Utilizando-se cadinhos de porcelana, nos quais foram pesados em balança analítica de precisão, 30 g de solo úmido e colocados em estufa a 105°C por 24 h. Posteriormente, os cadinhos foram retirados da estufa e colocados em dessecador com sílica indicadora de umidade, até que se atingisse a temperatura ambiente. Após resfriados, os cadinhos contendo os solos secos foram novamente pesados na mesma balança de precisão analítica. O cálculo da umidade atual gravimétrica (kg kg⁻¹) foi determinado conforme equação a seguir:

$$U_g = \left(\frac{a-b}{b} \right)$$

Em que:

U_g = Umidade gravimétrica (kg kg⁻¹)

a = Massa amostra úmida (kg)

b = Massa amostra seca (kg)

2.1.3. Análise de pH do solo

Para medir o potencial hidrogeniônico foi utilizada metodologia conforme Teixeira *et al.* (2017). Pesaram 10 g de TFSA que foram transferidos para béquer de 50 mL. Foram adicionados 25 mL de água destilada e, com auxílio de bastão de vidro individual, realizou-se processo de homogeneização por aproximadamente 1 min. A mistura ficou em repouso por 1 h, para então aferir o pH da solução e realizar a leitura das amostras. O pH foi mensurado pelo aparelho medidor de pH Aquaseacher modelo a-AB33M1 da marca Ohaus.

2.1.4. Análise de condutividade elétrica do solo

Para medir a condutividade elétrica foi utilizada metodologia adaptada de Teixeira *et*

al. (2017). Pesaram-se 50 g de TFSA em Erlenmeyer de 100 mL e adicionaram-se 50 mL de água destilada. Agitou-se esporadicamente a amostra, deixando em repouso por uma noite. Transcorrido o tempo, filtrou-se em papel de filtro comum. Quando necessário utilizou-se uma bomba à vácuo, coletou-se o filtrado em um béquer de 50 mL, aferiu-se com solução de calibração da condutividade e mediu-se a CE da amostra em $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ com o aparelho condutímetro Orion Star A212 da Thermo Scientific.

2.1.5. Análise de Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) trocáveis e Fósforo (P), Ferro (Fe) e Zinco (Zn) disponíveis

Para quantificar os íons de Ca, P, Mg, K, Fe e Zn foi utilizada metodologia descrita e adaptada por Teixeira *et al.* (2017). Adicionaram-se 50 mL da solução extratora de KCl a 1,0 mol/L as amostras de Ca e Mg, atingindo-se a proporção 1:10. Os frascos foram levados a uma mesa agitadora para serem agitados à 200 rpm por 5 minutos. Ao término da agitação as soluções ficaram em repouso por 16 horas. Esse processo tem a função de decantar materiais particulados da amostra para que se possa retirar uma alíquota líquida superficial do sobrenadante.

Para extração do Fe, K, P e Zn utilizou-se a solução extratora de Mehlich (1953) na proporção de solo/solução de 1:10.

Para leitura de cálcio e magnésio foi adicionado cloreto de estrôncio (SrCl_2) 0,5 mol/L para estabilização da chama do espectrofotômetro de absorção atômica (AAS).

Para leitura de fósforo foi adicionado o cromóforo constituído por molibdato de amônio ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$), ácido sulfúrico (H_2SO_4) e subcarbonato de bismuto ($\text{Bi}_2\text{O}_2(\text{CO}_3)$).

Para leitura de zinco foi utilizado espectrofotômetro de absorção atômica marca Perkin Elmer, modelo 3110.

Para leitura de potássio foi utilizado fotômetro de chama da marca Micronal.

Curvas de calibração foram montadas para cada elemento cuja leitura fora realizada em equipamentos seguindo a lei de Lambert-Beer, nas quais foram medidas absorbâncias de soluções padrão com concentração conhecida e posteriormente calculados a equação reduzida da reta $y = ax + b$.

Assumiu-se curvas com r^2 superiores a 0,9800. Todas as diluições foram calculadas

para obtenção das concentrações reais dos elementos detectados nos sedimentos.

2.1.6. Cálculo da Soma de bases (SB) e o percentual da Saturação de bases (V%)

Para a quantificação da SB e V% foi utilizada metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017), em que SB é o somatório dos teores das bases de: cálcio, magnésio, potássio e sódio em mmol/dm³, a partir da seguinte fórmula:

$$\text{Valor SB: } \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^{+} + \text{K}^{+}.$$

Em que:

Valor SB – soma de bases trocáveis, em mmol_c/dm³.

Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺ – teor de cálcio, magnésio, sódio e potássio trocáveis no solo em mmol_c/dm³.

Para o valor de V%, que indica a proporção da capacidade de troca de cátions do solo que é preenchida pelas bases trocáveis, seguiu-se a seguinte fórmula:

$$\text{Valor V\%: } \frac{100 * \text{SB}}{\text{T}}$$

Em que V%:

V% – percentagem de saturação por bases.

Valor SB – soma de bases trocáveis, em mmol_c/dm³

Valor T – capacidade de troca de cátions total em mmol_c/dm³ (representa o total de cargas negativas que o solo pode apresentar).

2.2. Análises de caracterização da vinhaça

A amostra de vinhaça utilizada para fertirrigar foi coletada no dia da sua aplicação, dia 17/07/2023, colocada em recipiente plástico vedado com tampa hermética e encaminhado ao laboratório da Universidade do Estado de Minas Gerais, Unidade Frutal - MG (UEMG Frutal), onde realizaram-se as seguintes análises: pH, condutividade elétrica, digestão de nitrogênio, digestão sulfúrica para quantificar cálcio, lítio, sódio e potássio.

2.2.1. Análise de pH da vinhaça

Para medir o potencial hidrogeniônico foram medidos 50 mL da vinhaça pura em proveta que foram transferidas para béquer de 100 mL, com auxílio de bastão de vidro,

realizou o processo de homogeneização por aproximadamente 1 min. O pH foi mensurado em peagômetro Aquaseacher modelo a-AB33M1 da marca Ohaus.

2.2.2. Análise de condutividade elétrica da vinhaça

A condutividade elétrica foi medida por meio de 100 mL de amostra pura em béquer de 150 mL. Foi realizada a aferição do aparelho STAR A2146 da marca Thermo Scientific com as soluções de calibração para então realizar a leitura da amostra, submergindo o eletrodo de leitura e anotando o valor.

2.2.3. Análise de nitrogênio (digestão sulfúrica) da vinhaça

Para medir a quantidade de nitrogênio foi pesado 0,1 mL de vinhaça que foi colocada em macrotubo para digestão, acrescentaram-se 200 mg da mistura digestora (485 gramas de sulfato de sódio anidro, 36 gramas de selenito de sódio, 40 gramas de sulfato de cobre pentahidratado) e 3 mL de ácido sulfúrico 95 a 98%. O macrotubo com o material no bloco digestor foi colocado em capela de exaustão até atingir 350°C para a digestão por um período de aproximadamente 1 hora ou até que a amostra atinja coloração clara. Após a digestão deixou-se a amostra esfriar e adicionaram 3 mL de água destilada. A amostra foi então levada ao destilador de nitrogênio. Iniciou-se o processo de destilação, abrindo o registro de água do destilador antes de ligar, verificando o volume de água na caldeira. Em seguida colocou-se o macrotubo com a amostra no suporte, abriu-se a válvula do copo dosador contendo hidróxido de sódio a 40% e, após a adição fechou-se o copo dosador. Colocou-se um Erlenmeyer de 250 mL contendo 10 mL de solução indicadora de vermelho de metila com verde de bromocresol e ácido bórico a 2% no suporte de coleta e ligou-se o destilador deixando o material destilar até que atingisse o volume de 50 mL no Erlenmeyer. Após a destilação a amostra foi titulada com HCl 0,05 mol/L mudando da cor verde para rosa. O volume de HCl gasto corresponde a 0,05 em g de N ou $0,05 \times 14 \text{ mg de N} = 0,7 \text{ mg de N}$. Ou seja, para 100 mg de amostra foram gastos, por exemplo, 5 mL de ácido a 0,05 mol/L, então, em 100 mg de amostra tem-se 3,5 mg de N. Ou ainda: $7 \times \text{Volume em mL de ácido gasto na titulação} = \text{concentração de N na amostra, dada em g de N / kg de MS}$.

2.2.4. Digestão nítrico-perclórica da vinhaça (Análise de nitrogênio)

A digestão nítrico perclórica ocorreu transferindo 2 mL para tubo digestor, adicionando 4 mL de ácido nítrico e deixando em repouso por 12 horas. Passado esse tempo, iniciou-se o processo de aquecimento em bloco digestor a 20°C até atingir 120°C, aumentando 20°C a cada meia hora. Quando a amostra apresentou perda de 50% de seu volume adicionaram-se 2 mL de ácido perclórico e aumentou-se a temperatura para 180°C, até a amostra ficar totalmente incolor, o que pode levar horas ou dias. Transcorrido esse tempo, foi feita a diluição da amostra com água destilada (1 mL da amostra em 49 mL de água) em balões volumétricos de 50 mL, filtrou-se a amostra, transcorrido esse processo, levou-se até o aparelho fotômetro de chama da marca Digimed modelo DM-64-4E para fazer a leitura dos cátions: cálcio, lítio, sódio e potássio.

2.3. Contagem de microrganismos do solo: diluição e preparo das amostras para contagem de microrganismos

Para diluição das amostras foram adicionados 5,0 g de TFSA a um Erlenmeyer contendo 45 mL de uma solução de pirofosfato de sódio 0,1% (p/v). Após agitação por 30 minutos, em mesa agitadora a 150 rpm foram feitas diluições decimais em série em tubos de ensaio tampados de 10^{-1} a 10^{-6} . Em seguida, alíquotas de 0,1 mL de cada diluição foram transferidas pelo método pour plate em placas de Petri contendo meio de cultura. As placas foram acondicionadas em saco plástico com o objetivo de evitar o ressecamento do meio de cultura (Olsen; Bakken, 1987; Sorheim *et al.*, 1989).

2.3.1. Bactérias totais, bactérias fixadoras de N e solubilizadoras de P e K (BT, BFN, BSF e BSK)

Para contagem do número total de microrganismos, bactérias fixadoras de N, solubilizadoras de P e K foram utilizadas as seguintes metodologias:

Para microrganismos totais: pesaram-se 18 g de ágar nutriente preparado conforme a embalagem, para 1 L de água destilada.

Meio YMA: foram pesados 10 g de manitol, 1 g de fosfato de potássio dibásico, 4 g de fosfato de potássio monobásico, 2 g de sulfato de magnésio heptahidratado, 1 g de cloreto de sódio, 0,4 g de extrato de levedura, 5 mL de solução de azul de bromotimol ou de vermelho de congo a 5% e 15 g de ágar bacteriológico, completando o volume para 1 L de água

destilada.

Meio Fósforo: foram pesados 10 g de glicose, 5 g de fosfato de cálcio anidro, 5 g de cloreto de magnésio hexahidratado, 0,25 g sulfato de magnésio, 0,2 g de cloreto de potássio, 0,1 g de sulfato de amônio e 15 g de ágar bacteriológico, completando o volume para 1 L de água destilada.

Meio Potássio: foram pesados 5 g de glicose, 0,5 g de sulfato de magnésio heptahidratado, 1 g de carbonato de cálcio, 0,005 g de cloreto de ferro III (férico), 3 g de pó de mica ou feldspato e 15 g de ágar bacteriológico, completando o volume para 1 L de água destilada.

Todos foram acrescidos de 1 g/L de uma mistura de antifúngico (fluconazol 150 mg dissolvido em 50 mL de etanol), para evitar contaminação. As amostras foram incubadas em estufas BOD (*Biochemical Oxygen Demand*), com temperaturas de 28°C a 30°C, em ausência de luz. As contagens foram feitas após 72 horas em um contador de colônias com 6x de aumento (Olsen; Bakken, 1987; Sorheim *et al.*, 1989).

2.3.2. Fungos totais (FT)

Foi utilizado o meio Martin, foram pesados: 1g de fosfato de potássio monobásico, 0,5 g de sulfato de magnésio heptahidratado, 5 g de peptona, 10 g de dextrose, 0,033 g de corante rosa de bengal, 15 g de ágar bacteriológico e completou-se o volume de 1 L com água destilada (Martin, 1950), para contagem do número total de fungos e acrescido com 1 g/L de mistura de antibiótico (amoxilina 500 mg dissolvida em 50 ml de etanol), As amostras foram incubadas em estufas BOD, com temperaturas de 28°C a 30°C, em ausência de luz por 72 horas. As contagens foram feitas em contador de colônias com 6x de aumento.

2.4. Determinação da atividade enzimática no solo

Para determinar a atividade enzimática das amostras foi utilizada metodologia para avaliar a desidrogenase descrita por Casida *et al.* (1964).

2.4.1 Determinação da atividade de desidrogenase

Foram pesados 3 g de TFSA em tubo de ensaio 18 x 180 mm, adicionou 0,03 g de carbonato de cálcio e 0,5 mL de cloreto de trifinil tetrazolio (TTC) a 3% (diluído em água

destilada) e 1,3 ml de água destilada (Casida *et al.*, 1964). A mistura foi homogeneizada, os tubos vedados com filme plástico PVC e colocados em banho-maria a 37°C por 24 horas. Após incubação, foram adicionados aos tubos de ensaio 10 mL de metanol, agitados em agitador vortex, colocaram-se mais 10 mL de metanol nos tubos e filtrou-se a amostra em papel filtro Whatman 42, recebendo o filtrado em béqueres de 50 ml, e a intensidade da cor vermelha foi medida em espectrofotômetro com absorbância de 485 nm.

A atividade enzimática foi determinada pela equação da atividade enzimática da desidrogenase.

Equação - equação da atividade enzimática da desidrogenase. $At = (v * x * d) / p$

Em que:

v – volume da amostra;

x – equação da curva padrão;

d – diluição da enzima;

p – peso seco da amostra.

2.5. Análises biológicas do solo

Para determinar as atividades biológicas das amostras foram utilizadas metodologias distintas para cada, processo. sendo elas: respiração basal do solo (RBS), carbono de biomassa microbiana (CB), carbono orgânico total (COT), quociente metabólico (qCO_2) e quociente microbiano do solo ($qMIC$).

2.5.1. Análise de RBS

Para medir a RBS foi utilizada metodologia adaptada de Teixeira *et al.* (2017). Pesaram-se 50 g de TFSA que foram umedecidos de acordo com a CC do solo, transferiu a amostra úmida para um béquer de 100 mL previamente seco. Após esse procedimento, pesou-se novamente o béquer com nova massa, transferiu-se para um pote de vidro de 5 l com fechamento hermético, juntamente com um outro béquer de 100 mL contendo 10 mL de solução de solução de NaOH a 1 M. Fechou-se bem o pote e o alocou para um local que deve ser isento de luminosidade e com temperatura ambiente, durante 10 dias. Foram feitas duas amostras branco, contendo apenas o béquer com 10 mL de NaOH a 1 M. Após o processo de incubação, retirou-se do pote o béquer contendo NaOH e adicionou-se 1 mL de $BaCl_2$ a 30%

(m/v) para a completa precipitação do CO₂, adicionaram-se 2 gotas de fenolftaleína 1% (m/v) e titulou sob agitação vigorosa com solução a 0,5 mol/L de HCl padronizada. A titulação finaliza quando a coloração da solução se altera de rosa à incolor. A amostra contendo solo umidecido foi levada a estufa para secagem a 105°C por 24 horas para determinação da umidade da amostra.

O cálculo da respiração basal do solo é dado pela seguinte equação :

$$\text{RBS (mg de C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo hora}^{-1}) = (((V_b - V_a) * M * 6 * 1000) / P_s) / T$$

Em que:

RBS = carbono oriundo da respiração basal do solo;

V_b (mL) = volume de solução de HCl gasto na titulação da solução controle (branco);

V_a(mL) = volume gasto na titulação da amostra;

M = concentração de mol/L exata do HCl;

P_s (g) = massa de solo seco e;

T = tempo de incubação da amostra em horas.

2.5.2. Análise de CBM

Para medir o CBM foi utilizada metodologia adaptada de Teixeira *et al.* (2017). No processo de extração foram pesados 30 g de TFSA que foram umidecidos com a CC do solo correspondente, cobriu-se com plástico filme, fez-se pequenos furos no plástico e deixou incubando uma noite. Transcorrido esse tempo pesaram-se 20 g de solo em dois Erlenmeyers de 125 mL devidamente identificados, um para ser irradiado e outro não; submeteu-se o Erlenmeyer que foi separado para irradiação por 1 min 12seg em forno micro-ondas.

Para medir a umidade do solo, pesaram-se mais 10 g da amostra de solo úmido em cadinho seco em estufa, identificou-se a amostra que foi colocada em estufa a 105°C por 24 h, para determinação da umidade.

Após a irradiação, acrescentaram-se aos dois Erlenmeyers (irradiado e não irradiado) 80 mL de sulfato de potássio (K₂SO₄) a 0,5 M e submeteu-se a agitação por 30 min. Passado esse período, deixou-se a amostra em repouso por mais 30 min e filtrou-se em papel filtro qualitativo, recolhendo o filtrado (extrato) em Becker de vidro de 50 mL. Coletaram-se 10 mL de cada extrato filtrado para Erlenmeyer de 125 mL, adicionaram-se 2,0 mL de dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇) a 0,066 mol/L e 10 mL de ácido sulfúrico (H₂SO₄) concentrado,

deixou-se esfriar e acrescentaram-se 50 mL de água destilada, esperou resfriar novamente e foram adicionadas 4 gotas de indicador ferroin. Titulou-se a amostra com solução de sulfato ferroso amoniacal ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) a 0,03 mol/L. A viragem de cor se deu quando a amostra passou de laranja escuro para vermelho tijolo. Fez-se 4 provas em branco, sendo 2 contendo todos os reagentes e mais 10 mL de K_2SO_4 0,5 mol/L, e 2 apenas com os reagentes sem o sulfato potássio, adicionando os mesmos reagentes e procedendo com a titulação.

Os valores de Carbono presente na biomassa microbiana foram calculados a partir da seguinte equação:

$$C_{\text{irr, Nir}} = \frac{(V_b - V_{\text{am}}) * (\text{conc. sulfato ferroso}) * 3 * 1000 * (\text{vol. extrator})}{(\text{vol. extrato} = 10 \text{ mL}) * (\text{peso do solo seco})}$$

Em que:

V_b – Média dos volumes gastos na titulação dos brancos;

V_{am} – Média dos volumes gastos na titulação das amostras triplicatas;

Conc. sulfato ferroso – 0,03 mol/L

3 – Resultado da relação entre o número de mols de $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ que reage com Fe (1/6), multiplicado pelo número de mols de $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ que reage com C (3/2), multiplicado pela massa atômica do C (12);

1000 – Fator de conversão de unidades;

Volume extrator – 80 mL, volume de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 0,5 mol/L utilizado na extração;

Volume extrato – 10 mL, volume da alíquota do extrato titulada.

O teor do carbono será:

$$CO \text{ (dag. kg}^{-1}\text{)} = \frac{(A) * (\text{Conc. Sulfato Ferroso}) * (3) * (100)}{\text{Massa da amostra (mg)}}$$

Em que:

100: fator de conversão de unidade ($\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ para $\text{dag} \cdot \text{kg}^{-1}$).

2.5.3. Análise de COT

Para medir o COT foi utilizada metodologia de Raij *et al.* (2001). Mediu-se com cachimbo, 1,0 cm^3 de solo, transferindo para erlenmeyer de 250 mL. Realizar três provas em

branco completa, sem solo. Adicionar 10,0 mL da solução de dicromato de potássio a 0,167 mol L⁻¹, mais 20 mL de ácido sulfúrico concentrado P.A. Agitou por um minuto e deixou resfriando durante 30 minutos.

Adicionou 200 mL de água destilada e filtrou através de papel de filtro, transferiu para erlenmeyer de 500 mL. Acrescentou 10 mL de H₃PO₄ concentrado P.A. e 4 gotas de solução de difenilamina. Titulou-se com solução de sulfato ferroso amoniacal, até viragem de azul para verde. A titulação da prova em branco serve para determinar a concentração da solução de sulfato ferroso amoniacal.

O sulfato ferroso amoniacal é padronizado por meio da titulação da prova em branco (todos os reagentes da marcha acima, sem o solo). O cálculo é feito por:

$$C_{Fe^{2+}} = \frac{10 \times 0,167 \times 6}{V_{br}}$$

V_{br}

Em que:

$C_{Fe^{2+}}$: a concentração, em mol L⁻¹ (ou mmol mL⁻¹) de Fe²⁺ na solução padronizada de sulfato ferroso amoniacal, para a reação com o dicromato de potássio;

V_{br} : o volume de sulfato ferroso amoniacal, em mL, gasto na titulação do branco.

Os fatores multiplicativos correspondem ao volume de dicromato (10), em mL, à concentração da solução de dicromato (0,167), em mol L⁻¹, e ao número de elétrons transferidos (6) no processo de redução.

Para determinar o COT:

$$COT = \frac{(V_{br} - V_{am}) \times C_{Fe^{2+}} \times 0,003 \times 1,33 \times 1.000}{V_{solo}}$$

Em que:

COT.: o teor de matéria orgânica, em g dm⁻³;

V_{br} – Média dos volumes gastos na titulação dos brancos;

V_{am} : o volume de sulfato ferroso amoniacal, em mL, gasto na titulação da amostra com solo;

V_{solo} : o volume de solo medido, em cm³.

Os fatores multiplicativos são:

0,003, em g mmol⁻¹, referente à razão [(0,001 x 12)/4], onde, 12 é a massa molar do carbono (g mol⁻¹), 0,001 é o fator para transformar em g mmol⁻¹ e 4 é o número de elétrons na oxidação da M.O [C(0) → C(IV), na forma de CO₂];

1,33: o fator de correção para a oxidação apenas parcial da matéria orgânica;

1.000: o fator para transformar cm^3 em dm^3 de solo.

2.5.4. Análise de $q\text{CO}_2$

Após a realizações das análises de RBS e CBM pode-se determinar o quociente metabólico do solo a partir da metodologia de Anderson; Domsch, 1993:

$$q\text{CO}_2 = \frac{\text{RBS}}{\text{CBM}}$$

CBM

Em que:

$q\text{CO}_2$ - Sua unidade é expressa em $\text{mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ CO}_2/\text{dia}^{-1}$

2.5.5. Análise de $q\text{Mic}$

Após as realizações das análises de CBM e COT pode-se determinar o quociente microbiano do solo a partir da metodologia de Anderson; Domsch, 1993 :

$$q\text{Mic} = \frac{\text{CBM}}{\text{COT}}$$

COT

Em que:

$q\text{Mic}$ – é expresso em porcentagem.

2.6. Análise estatística

Para avaliar a diferença entre os tratamentos em ambos os experimentos, os dados foram inicialmente testados quanto à normalidade e homocedasticidade. Em seguida, foi realizada uma análise de variância (teste F) com nível de significância de 5%. Quando o teste F indicou significância, as médias dos tratamentos foram comparadas utilizando o teste de Scott & Knott, também a 5% de significância.

Para a metodologia e construção do HeatMap, utilizou-se o software R (versão 4.4.2) e o pacote ggplot2, empregando uma escala de cores em gradiente para representar a magnitude dos valores. Os dados foram previamente inspecionados para normalidade e homogeneidade. O heat map permitiu a visualização integrada dos padrões entre variáveis, estações e manejos, destacando diferenças e tendências nos tratamentos avaliados e a análise dos resultados foram submetidas à regressão linear (Barbosa; Maldonado Jr., 2010).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise de pH e condutividade elétrica do solo

Dos resultados obtidos das análises de pH, observou-se que não ocorreu a acidificação do solo esperada com a aplicação de vinhaça (Figura 2). Embora a vinhaça seja naturalmente ácida, sua aplicação pode elevar o pH do solo. Ao longo do tempo, o pH dos solos tratados com vinhaça tendeu a aumentar. Nos primeiros dez dias após a aplicação, pode haver uma redução significativa do pH, mas posteriormente ele se eleva, podendo atingir valores acima da neutralidade (Cardin, 2014; Luz *et al.*, 2024). Após 150 dias da aplicação, o solo da área fertirrigada apresentou pH mais próximo da neutralidade ao longo do ano. Esse resultado indica que a vinhaça pode aumentar o pH do solo, o que pode ser benéfico, melhorando as propriedades físicas do solo e a disponibilidade de nutrientes para as plantas e promovendo reações biológicas de natureza redutora que consomem prótons fazendo com que o pH se eleve (Silva *et al.*, 2019).

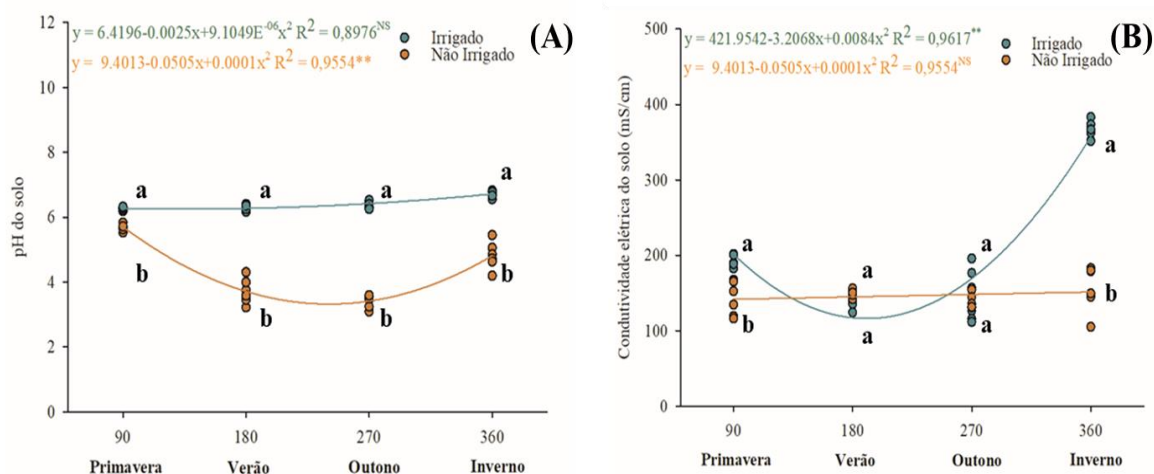


Figura 2 – Relação comparativa entre os manejos avaliados, para valores de pH (A) e condutividade elétrica (CE) (B) do solo. Letras iguais não diferem entre si pelo teste Scott Knott a 5% de significância.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Na área de controle, o pH permaneceu menor em comparação a que recebeu vinhaça. Sem a adição do subproduto, não ocorreu o processo de neutralização da acidez do solo que

ocorreu na área fertirrigada. A ausência da vinhaça resultou na acidez do solo, o que pode gerar pouca disponibilidade de nutrientes para as plantas, afetando a produtividade e o crescimento da planta (Lima *et al.*, 2015; Cardoso, 2021).

A condutividade elétrica (CE) na área fertirrigada iniciou-se maior na primavera (Figura 2), devido a aplicação ter ocorrido 30 dias antes da primeira coleta, sugerindo o aumento na concentração de cátions, como Ca, Mg, Na e K, que são constituintes do produto (Bebé *et al.*, 2009). Essa aplicação ofereceu nutrientes que, quando diluídos na solução do solo, aumentaram a CE, indicando maior concentração de sais. No entanto, no verão, a taxa de CE diminuiu devido a quantidade de chuvas que ocorrem nesse período do ano, com média de 300 mm. A partir do outono até o inverno, a região da área de pesquisa passou por um período de 150 dias sem chuvas, o que levou a concentração dos cátions disponíveis e o aumento da CE na área fertirrigada (Mundim *et al.*, 2018).

Por outro lado, na área sem aplicação de vinhaça, a CE se manteve estável, pois não existe a mesma carga de cátions e pouca disponibilidade de íons solúveis resultantes da fertirrigação. A condutividade elétrica desses solos geralmente foi influenciada por fatores naturais, como a composição mineral do solo, a drenagem, a lixiviação e a precipitação pluvial, gerando perda na qualidade do solo e na sua fertilidade sem os devidos tratamentos por fertilizantes (Lima *et al.*, 2015; Ferreira *et al.*, 2018).

3.2. Análises físico-químicas da vinhaça

Na Tabela 2 seguem os resultados obtidos para a caracterização da vinhaça utilizada no experimento. Nota-se que os valores dos compostos presentes na vinhaça são próximos dos citados na literatura (Costa *et al.*, 2021; Costa *et al.*, 2023).

Tabela 2– Composição da vinhaça utilizada para fertirrigar as áreas avaliadas.

Composição da vinhaça	Valores
pH	4,2 ± 0,05
Condutividade elétrica (dS m ⁻¹)	86,98 ± 0,02
Nitrogênio total (mg L ⁻¹)	35,80
Cálcio (mg L ⁻¹)	189,50
Lítio (mg L ⁻¹)	27
Sódio (mg L ⁻¹)	531,50
Potássio (mg L ⁻¹)	3.289,00

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Na Figura 3 têm-se os dados pluviométricos coletados ao longo do período do experimento, com características climáticas marcantes, com duas estações bem definidas uma estação seca (maio a setembro) e chuvosa (outubro a abril), alternância que difere esses períodos de chuva e seca, influencia diretamente as variáveis pesquisadas, a vegetação e os microrganismos presentes nas áreas de estudo durante as estações do ano. O Cerrado é bioma característico, pois apresenta apenas duas estações distintas na maior parte do seu território, uma chuvosa e quente, seguida de uma fria e seca (Santos; França, 2018; Lima *et al.*, 2020; Lacerda; Mapeli, 2021).

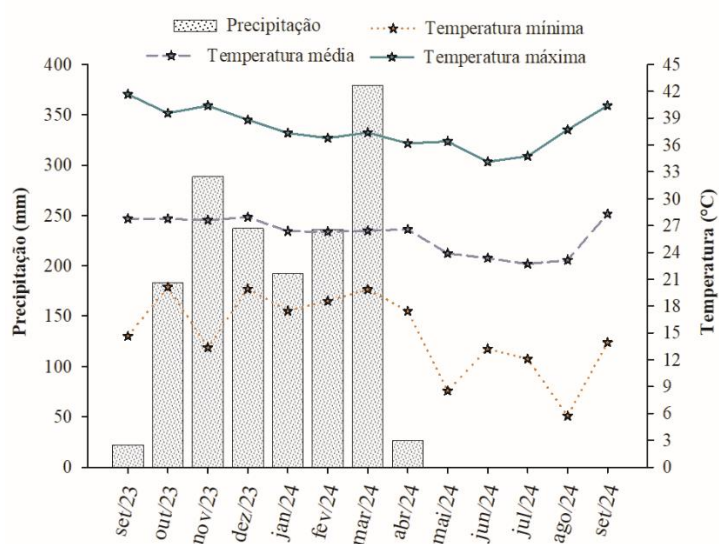


Figura 3 - Temperaturas e precipitações ao longo do ano na área do experimento.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

3.3. Análise de Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) trocáveis e Fósforo (P), Ferro (Fe) e Zinco (Zn) disponíveis, Soma de bases (SB) e o percentual da Saturação de bases (V%)

A Figura 4 apresenta as regressões lineares obtidas para os valores de quatro macronutrientes (Ca, P, Mg e K) e dois micronutrientes (Fe e Zn).

O Ca^{2+} é um elemento importante para a saúde do solo, com a pesquisa indicando que a aplicação de vinhaça resultou em aumento na disponibilidade desse nutriente ao longo do ano avaliado, mostrando que nas estações de verão e outono houve queda nos seus valores

em ambos os tratamentos. A maior concentração deste elemento na área fertirrigada é relevante, pois a presença de cálcio pode contribuir para a melhoria da estrutura do solo, aumentando a sua capacidade de retenção de água e a atividade biológica (Tavares *et al.*, 2024; Zamarreño *et al.*, 2022).

Em relação ao P, os dados mostraram diminuição na disponibilidade deste nutriente com o passar do tempo no tratamento com vinhaça, diferente do controle, no qual houve aumento no inverno. Isso sugere que, embora a vinhaça tenha potencial para melhorar a fertilidade do solo, sua eficácia em aumentar os níveis de fósforo pode ser limitada (Rocha, 2021).

O K foi um dos nutrientes que mais aumentaram com a aplicação de vinhaça, visto que é o de maior concentração na vinhaça. A pesquisa demonstrou aumento significativo na disponibilidade de potássio no solo em que a vinhaça foi aplicada e, nos meses de seca, quando não houve chuvas, auxiliando a planta na sua capacidade de regulação do balanço hídrico e a síntese de proteínas, especialmente quando comparado às áreas que não receberam este tratamento (Nascimento Júnior *et al.*, 2017; Oliveira *et al.*, 2024).

Com relação ao Mg^{2+} , observou-se que, assim como o cálcio, a aplicação de vinhaça contribuiu para melhora na disponibilidade desse nutriente no solo. O magnésio desempenha um papel na fotossíntese e na ativação de algumas enzimas, sendo importante para o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar. A presença desses íons é importante para a agregação das partículas do solo, melhorando sua capacidade de retenção de água e nutrientes. No uso de vinhaça, a aplicação resultou em aumento na concentração de Mg^{2+} sugerindo melhora nos aspectos físicos do solo (Ferreira *et al.*, 2018).

O Fe apresentou curva estável no tratamento com vinhaça. No entanto, no controle houve aumento na quantidade presente no solo durante os meses de chuva e voltou a se estabilizar no período de estiagem, sugerindo que é um micronutriente valioso para o crescimento das plantas e participa de vários processos fisiológicos e a nutrição da cana-de-açúcar (Cardoso, 2021; Zamarreño *et al.*, 2022).

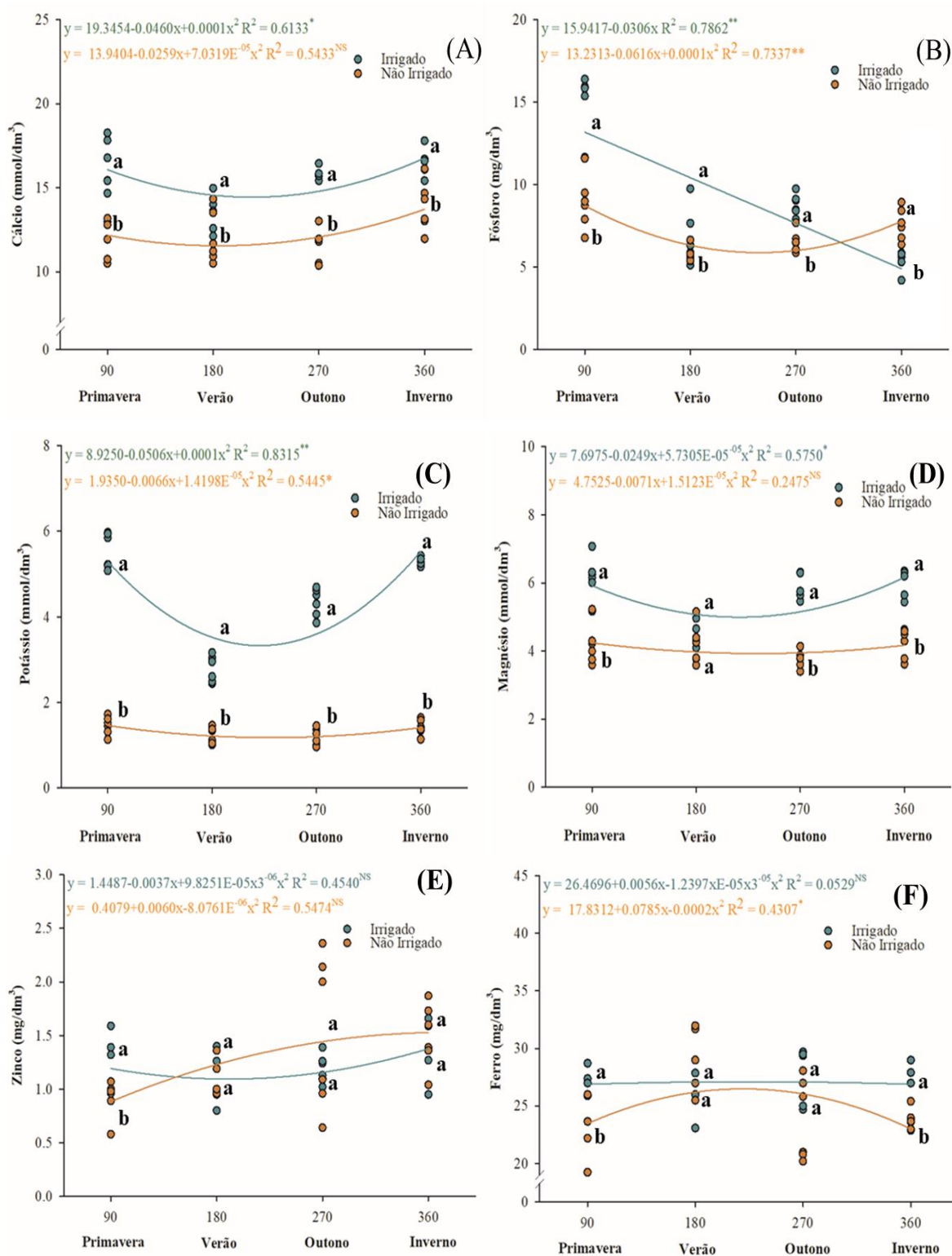


Figura 4– Comportamento do Cálcio (A), Fósforo (B), Potássio (C), Magnésio (D), Ferro (Fe), Zinco (E) e Ferro (F) na presença ou não de fertirrigação ao longo das estações. Letras iguais não diferem entre si pelo teste Scott Knott a 5% de significância.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

O Zn também se enquadra na categoria dos micronutrientes fundamentais para a cultura da cana-de-açúcar. O comportamento das curvas mostra que o tratamento sem vinhaça se destacou na quantidade que pode ser oferecida para a planta e microrganismos, no entanto, por ser considerado um micronutriente tanto as plantas como os microrganismos aproveitaram mais o zinco na área fertirrigada do que na área controle. A aplicação de vinhaça pode melhorar a disponibilidade de zinco no solo, uma vez que a matéria orgânica pode aumentar a solubilidade e a absorção desse nutriente, auxiliando no crescimento da planta e na formação de clorofila (Mundim *et al.*, 2018; Tavares *et al.*, 2024).

Resultados da soma de bases (SB) e a saturação de bases (V%) podem ser observados na Figura 5, sendo importantes em análises de solo e podendo ser abordados quando se discute o uso de biofertilizantes, como a vinhaça melhorando a fertilidade e a qualidade do solo.

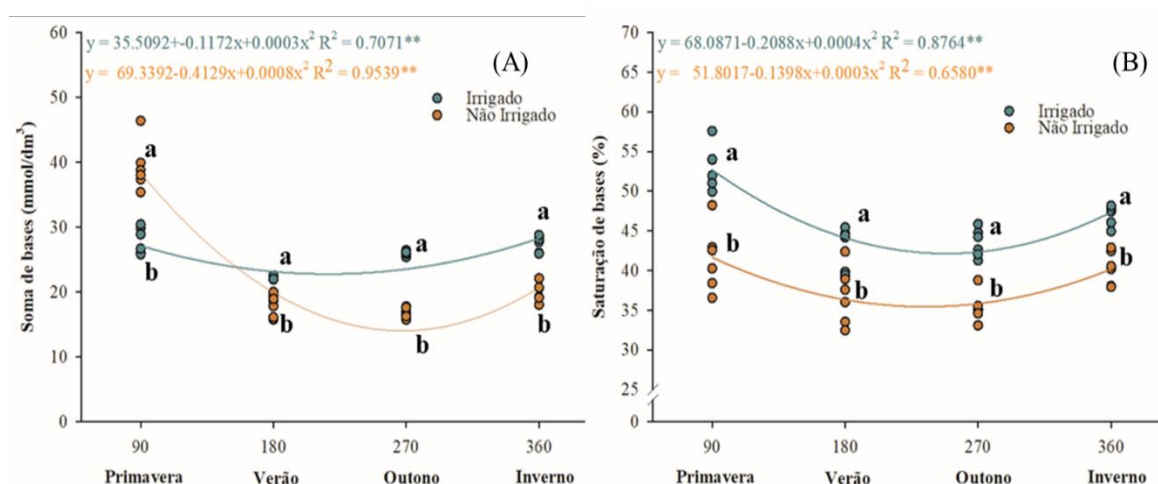


Figura 5 – Comportamento da Soma de bases (SB) (A) e Saturação de bases (V%) (B) na presença ou não de fertirrigação ao longo das estações. Letras iguais não diferem entre si pelo teste Scott Knott a 5% de significância.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

A SB permaneceu estabilizada no tratamento fertirrigado, diferentemente do controle, que ao longo de todo o período do experimento apresentou queda em relação ao valor inicial, indicando um decréscimo na fertilidade do solo, na proporção da capacidade de troca catiônica do solo que foi mantida pelos cátions de Ca, P e K, mostrados anteriormente na Figura 4 Corroborando que os dados apresentados, eles interagem entre si, mostrando que a

fertirrigação estabeleceu o equilíbrio que o solo fertirrigado apresentou ao longo das estações, assim como ocorreu nos experimentos de Cardin (2014) e Bridhkitti *et al.* (2023).

Os valores para V% estiveram altos no início do experimento e foram diminuindo até o outono, devido a absorção dos macronutrientes pelos microrganismos. Isso mostra que estes nutrientes são fundamentais para promoverem o desenvolvimento das raízes, a saúde das folhas e a resistência a pragas e doenças. Esses valores são importantes uma vez que o valor de V% adequado ao cultivo de cana deve estar em percentual ideal de saturação por bases em torno de 70% para promover um equilíbrio adequado entre todos os parâmetros, sendo que a área fertirrigada ficou mais próxima desse valor (Purcena *et al.*, 2014; Serafin *et al.*, 2023).

3.4. Umidade gravimétrica e análises microbiológicas

Na Figura 6 estão os resultados obtidos para umidade. Observou-se que os resultados de ambos os manejos para umidade decresceram ao longo do período, comprovando os dados da Figura 4, onde houve maior período de chuva nos meses de outubro a março, porém as temperaturas nesses períodos são altas ocasionando dias mais quentes, em que não ocorreram precipitação, fazendo com que o solo perdesse umidade ao longo do período.

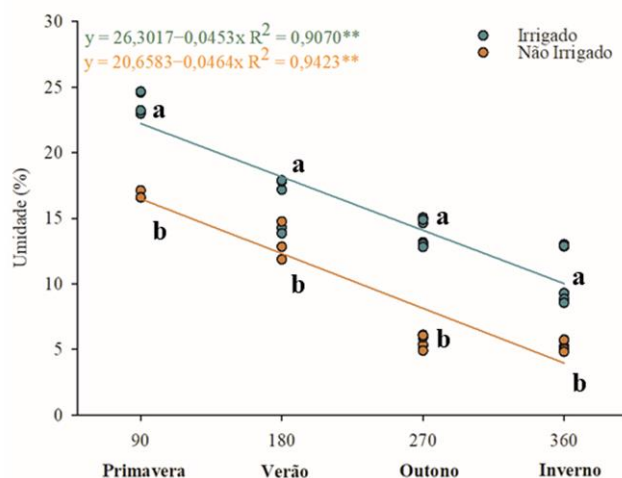


Figura 6 – Comportamento da Umidade na presença ou não de fertirrigação ao longo das estações. Letras iguais não diferem entre si pelo teste Scott Knott a 5% de significância.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

No tratamento controle que não recebeu aplicação de vinhaça, a umidade foi inferior comparada àqueles que recebem a aplicação desse subproduto. A vinhaça, ao ser incorporada ao solo, contribui com aumento hídrico, pois possui água na sua composição (Possignolo *et al.*, 2017; Stephen *et al.*, 2024).

No solo controle, a umidade foi afetada negativamente devido compactação do solo e sua menor capacidade de retenção de água, resultando em maiores perdas por escoamento superficial, exposição direta aos raios solares e menor disponibilidade hídrica para a cultura. A umidade é muito importante para sobrevivência e atividade tanto da microbiota como da planta, pois afeta o crescimento, metabolismo e sua interação biológica, sendo importante também para as práticas e manejos agrícolas. Isso pode ser especialmente benéfico em regiões onde a disponibilidade de água é limitada, pois a presença de matéria orgânica no solo pode ajudar a manter níveis adequados de umidade para o desenvolvimento das plantas e dos microrganismos (Silva *et al.*, 2019).

No manejo fertirrigado houve diminuição na população de bactérias totais (BT) entre a primavera e o verão, em seguida, a população aumentou significativamente ao final do período. Já no manejo controle, os valores populacionais de BT diminuíram no final do período (Figura 7). A população de fungos totais (FT) era menor no início do período na área fertirrigada, porém aumentou, especialmente entre o verão e o outono.

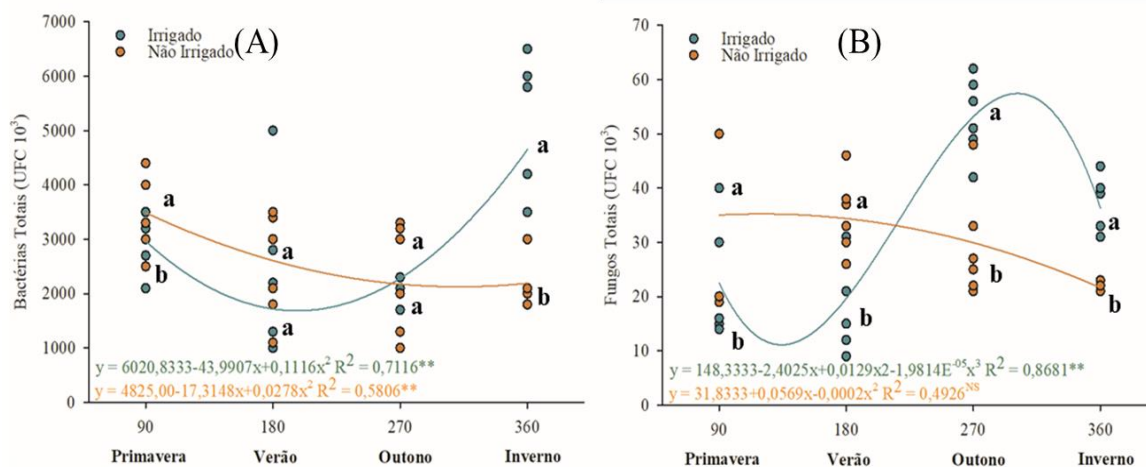


Figura 7 – Comportamento da contagem de bactérias totais (BT) (A) e fungos totais (FT) (B) na presença ou não de fertirrigação ao longo das estações. Letras iguais não diferem entre si pelo teste Scott Knott a 5% de significância.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

A aplicação da vinhaça pode ter selecionado microrganismos, que ao longo do tempo se adaptaram com a disponibilização de grandes quantidades de matéria orgânica, água, umidade, sais, micro e macronutrientes (Batista; Silva, 2022; Carpanez *et al.*, 2022)

A contagem de FT no solo controle foi maior no período de chuvas e depois houve decréscimo nas populações. Pode-se associar isso ao fato de que para a sobrevivência, crescimento, a umidade do solo influencia diretamente a atividade metabólica dos fungos e a sua capacidade de se desenvolver e colonizar ambientes. Em solos úmidos, a água é essencial para várias funções biológicas, incluindo a absorção de nutrientes e a respiração celular.

A disponibilidade de água também afeta a taxa de decomposição da matéria orgânica. Sendo os fungos os agentes decompositores primários em muitos ecossistemas, e a umidade adequada facilita a hidrólise da matéria orgânica, permitindo que os fungos convertam a matéria em nutrientes disponíveis. Em solos muito secos, a atividade fúngica pode ser drasticamente reduzida, levando a uma desaceleração da decomposição e da ciclagem de nutrientes, o que pode impactar a fertilidade do solo e a saúde das plantas (Canei *et al.*, 2018; Del Gobbo *et al.*, 2019; Fernandes; Oliveira, 2023).

As populações de bactérias solubilizadoras de fósforo (BSP) (Figura 8) foram maiores na área fertirrigada no início do período, possivelmente devido ao solo estar com maior concentração de fósforo, o que favoreceu a solubilização e o crescimento dessas espécies, nesses locais, uma vez que a maior parte dos agricultores adicionam fertilizantes fosfatados em suas culturas para o rápido desenvolvimento da planta. As BSP presentes no solo sem vinhaça obtiveram um crescimento no inverno, sendo estatisticamente igual ao tratamento com vinhaça, onde existe maior disponibilidade de fósforo na área (Rodrigues *et al.*, 2023).

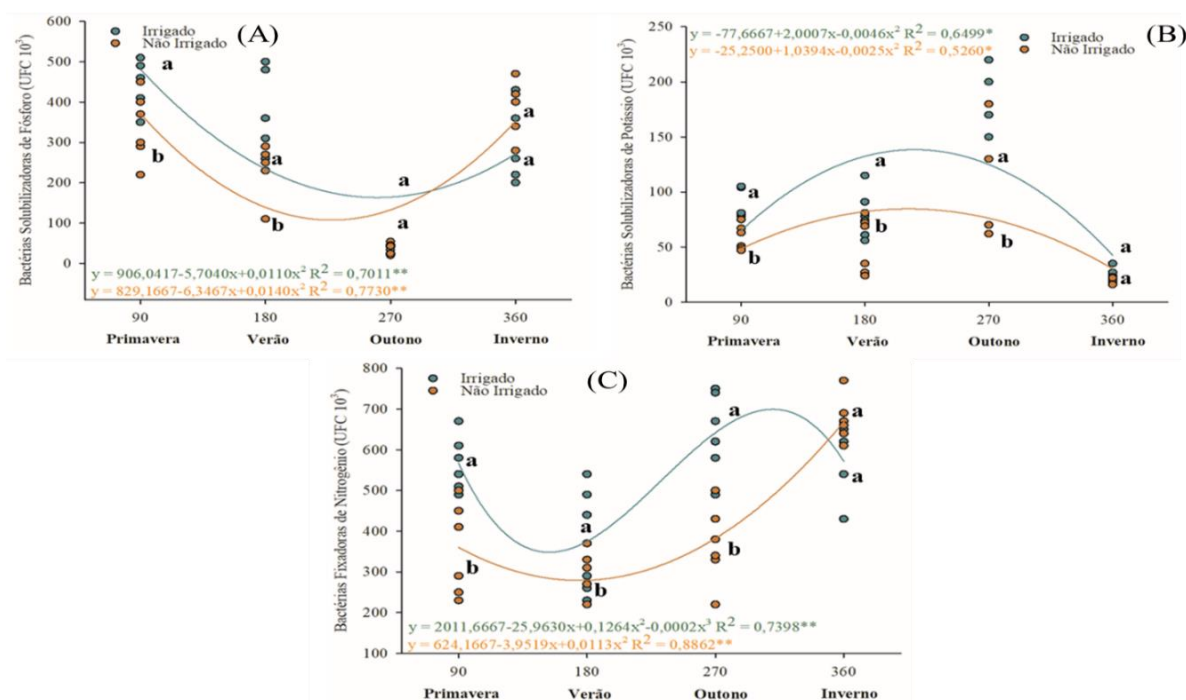


Figura 8 – Comportamento da contagem de bactérias solubilizadoras de fósforo (BSP) (A), e contagem de bactérias solubilizadoras de potássio (BSK) (B) e a contagem de bactérias fixadoras de nitrogênio (BFN) (C) na presença ou não de fertirrigação ao longo das estações. Letras iguais não diferem entre si pelo teste Scott Knott a 5% de significância.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Para as populações de bactérias solubilizadoras de K (BSK) foram maiores na área fertirrigada, devido ao solo estar com maior concentração deste elemento (Figura 8). Porém, no inverno, as populações se mantiveram estatisticamente semelhantes, com menos K disponível no solo, associando a presença de potássio a um ambiente favorável para a atividade microbiana, promovendo a diversidade e a abundância de microrganismos que contribuem para a disponibilização de nutrientes. Essa atividade microbiana demonstra um efeito positivo na estrutura do solo, melhorando sua aeração, retenção de água e a capacidade de troca catiônica, característica importantes para a saúde das plantas (Silva, *et al.*, 2019). Além disso, um solo com maior atividade bacteriana apresenta melhor disponibilização do potássio, facilitando a absorção deste nutriente pelas raízes das plantas, além da sua síntese de proteínas, a regulação da abertura e fechamento dos estômatos, e a resistência a estresses contra intempéries (Yang *et al.*, 2013; Gasparotto *et al.*, 2019; Oliveira; Damiani, 2024).

As populações de bactérias fixadoras de N (BFN) (Figura 8) no manejo com vinhaça foram maiores em três estações, sendo que apenas no inverno não houve diferença estatística

em relação à área controle. A umidade proporcionada pela vinhaça pode estimular a multiplicação dessas bactérias, que converteram o nitrogênio atmosférico em formas assimiláveis pelas plantas. Além disso, a vinhaça contribuiu diretamente para a capacidade de retenção de água e a mineralização e mobilização de nutrientes como fósforo e potássio (Bald *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2021).

Essa interação enriquece o ambiente do solo, favorecendo o equilíbrio dos ciclos biogeoquímicos e a liberação de nutrientes essenciais. A biodiversidade microbiana entre estes três tipos (BFN, BSK e BSP) associada a fertirrigação da vinhaça e da maior umidade, desempenhou funções na decomposição da matéria orgânica e permitindo maior disponibilização de nutrientes no solo (Christofolletti *et al.*, 2013; Hyeda, 2020; Stephen *et al.*, 2024).

A vinhaça pode influenciar a atividade e a diversidade de certos microrganismos presentes que são responsáveis pela decomposição da matéria orgânica constituinte na vinhaça e no solo, resultando na liberação de nutrientes, seleção de tipos e espécies de microrganismos e nematoides. Além disso, a atividade microbiana na vinhaça pode contribuir para a redução da carga poluente desse resíduo, tornando-o menos impactante para o meio ambiente (Costa *et al.*, 2021; Costa *et al.*, 2023; Freitas *et al.*, 2023).

3.5. Análises enzimáticas e metabólicas

Nas áreas analisadas, a atividade de desidrogenase foi maior no verão e no outono se comparado com os outros períodos. Foi observado também que atividade da enzima era maior na área controle no início, porém ao longo do tempo a atividade da desidrogenase ficou mais elevada no solo fertirrigado (Figura 9). Estes ensaios enzimáticos demonstraram interações entre a atividade enzimática com as quantidades de microrganismos que as sintetizam e o equilíbrio do solo. A aplicação de vinhaça no solo influenciou a atividade da enzima desidrogenase ao longo do tempo, a qual está relacionada à atividade microbiana do solo. Foi observado que a atividade da desidrogenase foi maior com a aplicação de vinhaça em comparação com o solo sem manejo durante o outono e inverno, corroborando os resultados de bactérias e fungos totais no solo. Isso sugere uma maior atividade microbiana na decomposição do carbono presente na vinhaça, o que pode impactar a ciclagem de

nutrientes no solo em períodos em que a umidade do solo é menor e a concentração de compostos é maior (Pinto *et al.*, 2022).

A interação entre enzimas, microrganismos e vinhaça é crucial para a degradação, transformação e disponibilização desse subproduto para as plantas. As enzimas desempenham papel fundamental na decomposição dos compostos da vinhaça, liberando nutrientes para o solo. Os microrganismos presentes, como bactérias e fungos, são responsáveis pela degradação dos componentes da vinhaça, influenciando a qualidade do solo. Essas relações são essenciais para compreender os processos de degradação, transformação e fixação de nutrientes, seja pelos microrganismos, seja pelas plantas (Christofolletti *et al.*, 2013; Costa *et al.*, 2023). A presença de certos microrganismos na vinhaça pode contribuir para a liberação de nutrientes, como nitrogênio, e para a produção de enzimas que auxiliam no metabolismo das plantas, favorecendo seu desenvolvimento.

As enzimas produzidas pelos microrganismos do solo degradam e transformam os compostos orgânicos da vinhaça, que modificam a disponibilidade de nutrientes e a ciclagem de carbono no ecossistema do solo, impactando os processos bioquímicos e a fertilidade do solo (Costa *et al.*, 2023).

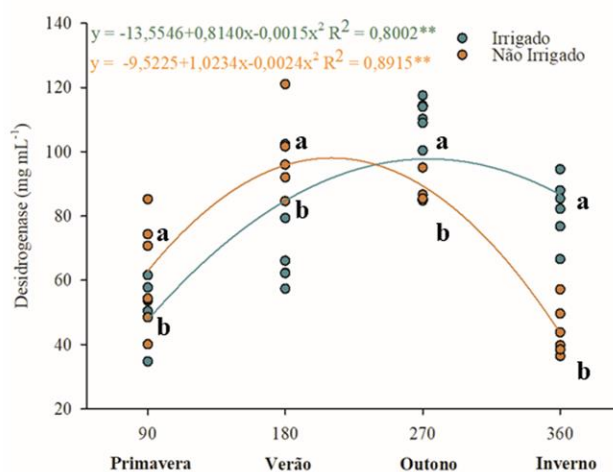


Figura 9 – Comparação da concentração de desidrogenase na presença ou não de fertirrigação ao longo das estações. Letras iguais não diferem entre si pelo teste Scott Knott a 5% de significância.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

A desidrogenase reflete a atividade oxidativa total da microbiota em estado livre no solo. Essas atividades enzimáticas são indicativas das atividades biológicas do solo e podem fornecer informações sobre a saúde e a qualidade do solo (Chaer *et al.*, 2023). A aplicação de vinhaça garante efeitos significativos em comparação com a fertilização química ou solo sem fertirrigação (Pinto *et al.*, 2022).

A respiração basal do solo (RBS) foi maior na área fertirrigada, em todo o período do experimento (Figura 10). A respiração basal é um indicador da atividade microbiológica do solo e da saúde do solo. Esta variável é usada em análises de solos para avaliar a dinâmica do carbono e a atividade dos microrganismos presentes (Perin *et al.*, 2021), sendo medido pela quantidade de dióxido de carbono (CO_2) liberado a partir da decomposição da matéria orgânica por microrganismos que metabolizam os compostos orgânicos no solo. Este processo é importante para o ciclo do carbono e pode refletir a capacidade do solo em fornecer nutrientes para as plantas. A respiração basal é influenciada por fatores como a temperatura, umidade, textura do solo, e o tipo de manejo agrícola aplicado. Os dados indicaram que ambos os solos estão em equilíbrio, mas a atividade no solo fertirrigado foi maior comprovando a interação entre a vinhaça e os demais atributos que contribuem para a atividade de bactérias e fungos que alternaram seus crescimentos ao longo da avaliação da pesquisa, principalmente entre verão e outono (Jonge, 2022; Chaer *et al.*, 2023).

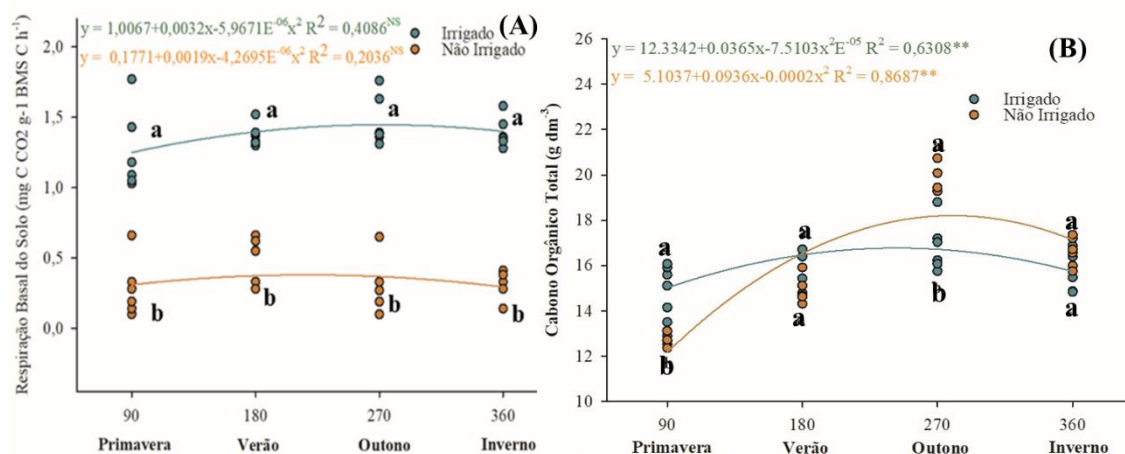


Figura 10 – Comparação de respiração basal do solo (RBS) (A) e a produção do carbono orgânico do solo (COT) (B) na presença ou não de fertirrigação ao longo das estações. Letras iguais não diferem entre si pelo teste Scott Knott a 5% de significância.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Os manejos apresentaram consumo semelhante do carbono orgânico do solo (COT) nas estações do verão e inverno, podendo estar associado ao aumento da atividade microbiana ao longo do tempo. O solo fertirrigado, manteve constante a preservação do carbono orgânico correlacionando com a atividade enzimática e desenvolvimento de microrganismos no decorrer das estações, sugerindo que a conservação do carbono orgânico promove um impacto positivo na atividade de enzimas e, conseqüentemente, na qualidade do solo (Purcena, 2014; Pinto *et al.*, 2022).

O carbono da biomassa (CB) foi maior na área fertirrigada, divergindo da área controle, que os níveis foram caindo com o passar do tempo, apresentando uma alteração na dinâmica e na composição da comunidade microbiana do solo após a aplicação de vinhaça (Figura 11).

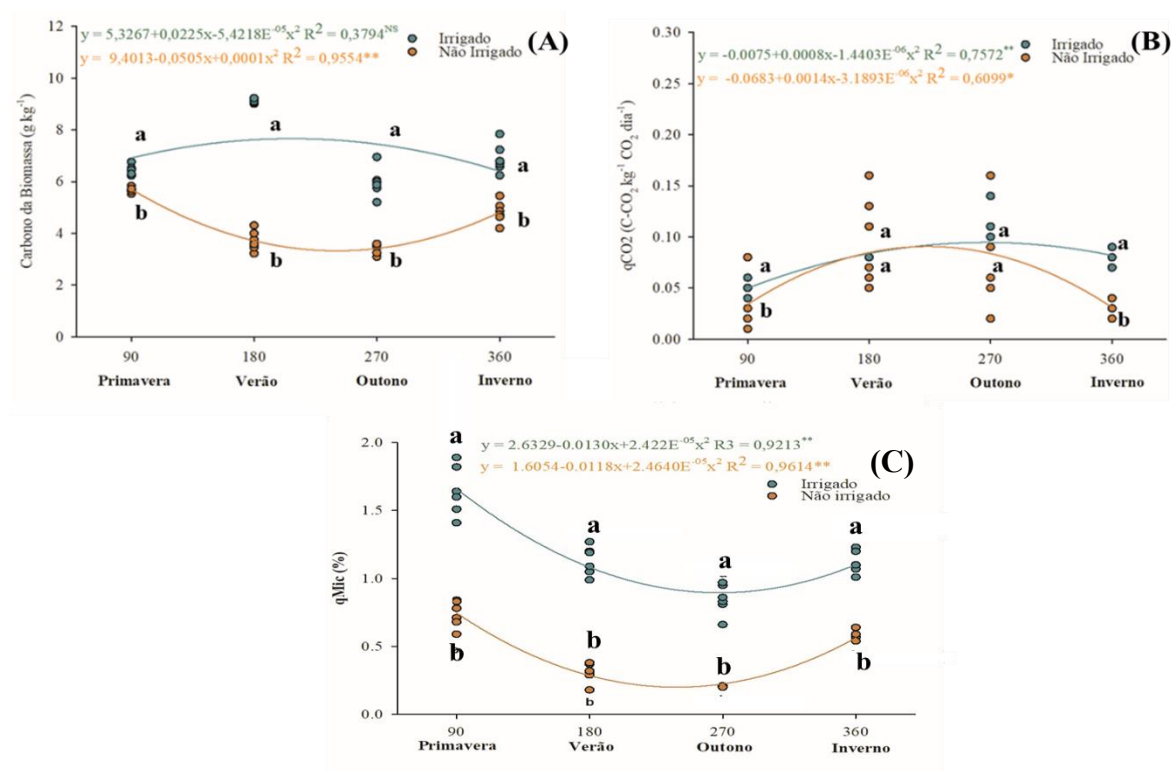


Figura 11 – Comparação de produção do carbono de biomassa (CB) (A), de quociente metabólico (qCO₂) (B) e o quociente microbiano (qMic) (C) na presença ou não de fertirrigação ao longo das estações. Letras iguais não diferem entre si pelo teste Scott Knott a 5% de significância.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

A biomassa microbiana desempenha um papel crucial na ciclagem de nutrientes e na saúde do solo. Sua redução combinada com o aumento do nitrogênio, aponta para uma possível mudança na atividade microbiana e na forma como os microrganismos interagem com os nutrientes disponíveis no solo facilitando a absorção de nutrientes pela planta e o seu crescimento (Christofolletti *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2019; Pinto *et al.*, 2022).

O quociente metabólico do solo (qCO_2) apresentou valores maiores no intervalo entre o verão e o outono (Figura 12) em ambos os tratamentos. Na primavera e no inverno, o solo fertirrigado possuiu quantidade maior se comparado. Isto indica como a razão entre a taxa de respiração microbiana (ou a taxa de CO_2 liberado) e a biomassa microbiana se relacionam com a atividade metabólica de microrganismos, em relação à quantidade de biomassa presente. O qCO_2 elevado indica uma maior proporção da biomassa microbiana ativa, apontando um sistema saudável e eficiente no ciclo de nutrientes, contribuindo para o consumo da vinhaça aplicada ao solo (Christofolletti *et al.*, 2013; Hoarau *et al.*, 2018; Montiel-Rosales *et al.*, 2022).

O quociente microbiano ($qMic$) da área fertirrigada foi maior que da área controle durante todo o período (Figura 12), sugerindo que esses crescimentos estão associados à proporção de biomassa microbiana em relação ao total de carbono no solo, permitindo entender a contribuição relativa da biomassa microbiana ao estoque total de carbono. Isso não apenas revela a quantidade de microrganismos, mas também sua capacidade de reciclar nutrientes de maneira eficaz, principalmente os contidos na vinhaça (Passignolo *et al.*, 2017; Stephen *et al.*, 2024).

Esses dois quocientes têm uma relação direta, pois um aumento no coeficiente microbiano geralmente indica uma maior atividade metabólica. Com a aplicação de vinhaça, tanto o coeficiente microbiano, o quociente metabólico e a atividade enzimática são favorecidos, sugerindo que esses tratamentos aumentam a atividade orgânica do solo, melhorando suas propriedades gerais e, portanto, a produtividade da cana-de-açúcar (Yang *et al.*, 2013; Christofolletti *et al.*, 2013; Pinto *et al.*, 2022; Chaer *et al.*, 2023).

3.6. Análise de componentes principais (PCA) dos parâmetros físico-químicos, biológicos e metabólicos do solo

Cada solo é único e devido à combinação de sua geologia, tempo de formação, histórico de manejo, estrutura topográfica e interação com a biota, tornando a compreensão dessa interação crucial para práticas agrícolas sustentáveis (Tecon; Or, 2017). As interações entre as BSP e BSK foram satisfatórias para que estes microrganismos se desenvolvessem e se adaptassem melhor ao ambiente fertirrigado.

A diversidade microbiana do solo é fundamental para a saúde e fertilidade desse ambiente, sendo influenciada por diversos desafios enfrentados pelos microrganismos. A disponibilidade de nutrientes, presença de substâncias tóxicas, competição e predação, bem como variações sazonais, representam obstáculos significativos para a atividade e sobrevivência dos microrganismos no solo (Ferreira *et al.*, 2017). Como pode ser visto na Figura 13, a BSP, CB, SatB, K e a desidrogenase foram os fatores que mais se destacaram em todos os desdobramentos estatisticamente apresentados, uma vez que a quantidade de microrganismos no ambiente foi importante para o constatar o equilíbrio, a diversidade e atividade dos microrganismos no solo como indicadores da atividade microbiológica e de sua saúde (Bald *et al.*, 2021). A interação da microbiota em solos agrícolas com o sistema de uso da terra é muito complexa, pois ela pode ser influenciada por diversos fatores como pH, temperatura, disponibilidade de água, textura do solo e presença de nutrientes, atividade enzimática e metabólica.

A análise dos dados revela correlações estatisticamente significativas entre a aplicação de vinhaça e os parâmetros avaliados, consolidando o papel da fertirrigação como o melhor tratamento para o cultivo de cana-de-açúcar. Os resultados indicaram que a carbono de biomassa microbiana (CB) foi maior nas áreas fertirrigadas, refletindo alterações na microbiota do solo em comparação com áreas de controle, onde os níveis diminuíram ao longo do tempo. Essa biomassa desempenha um papel na ciclagem de nutrientes, permitindo maior absorção de nutrientes pela planta e promovendo seu crescimento (Bald *et al.*, 2021).

A atividade enzimática da desidrogenase foi influenciada pela vinhaça, com maior intensidade nos períodos de outono e inverno. Isso mostra um aumento na decomposição do carbono presente na vinhaça e na ciclagem de nutrientes em períodos de menor umidade. Esses resultados indicam que esta enzima do solo é uma indicadora de qualidade, atribuindo a contribuição da vinhaça para a atividade oxidativa da microbiota (Chaer *et al.*, 2023).

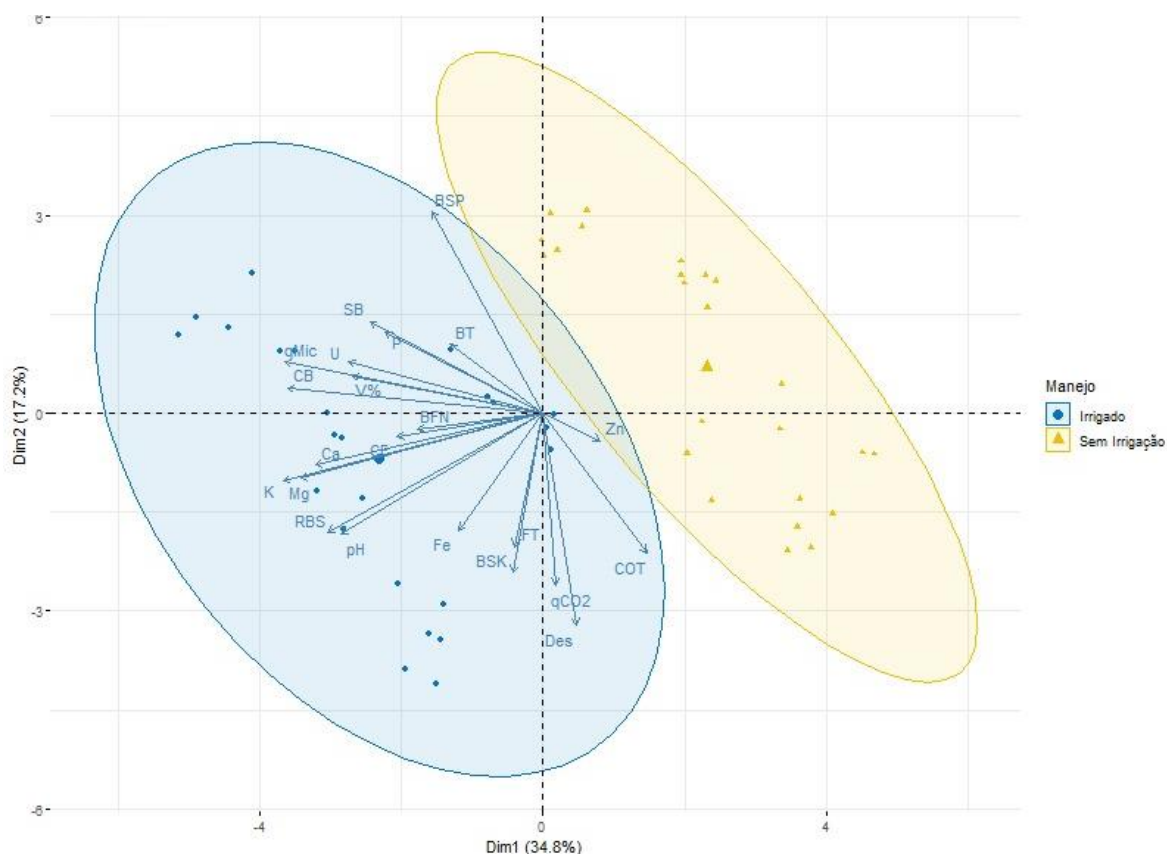


Figura 12 – Análise dos componentes principais analisados ao longo da pesquisa no biênio 2023/2024, onde as seguintes siglas correspondem a: BFN: bactérias fixadoras de nitrogênio; BSK: bactérias solubilizadoras de potássio; BSP: bactérias solubilizadoras de fósforo; BT: bactérias totais; Ca: cálcio; CB: carbono de biomassa; CE: condutividade elétrica; COT: carbono orgânico total; Des: desidrogenase; Fe: ferro; FT: fungos totais; K: potássio; Mg: magnésio; P: fósforo; pH: potencial hidrogeniônico; qCO₂: quociente metabólico; qMic: quociente microbiano; RBS: respiração basal do solo; SB: soma de bases; U: umidade; V%: saturação de bases; Zn: zinco.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Por outro lado, o crescimento de bactérias solubilizadoras de fósforo (BSP) foi mais evidente em solos sem vinhaça durante o inverno, correlacionando-se com maior eficiência na absorção de fósforo pela rizosfera. As concentrações de potássio (K), no entanto, destacaram-se como o maior benefício da vinhaça, com aumento significativo durante meses de seca, auxiliando na síntese de proteínas e na regulação hídrica das plantas (Silva *et al.*, 2019; Rodrigues *et al.*, 2023).

A PCA (Figura 13) mostrou que a maior parte de todos os parâmetros avaliados se relacionaram melhor no tratamento fertirrigado ao ser comparado com o controle, evidenciando que a fertirrigação adequada no solo traz benefícios para todo ambiente de plantação, contribuindo com o crescimento da vida no solo e saúde da planta.

4. CONCLUSÃO

A aplicação localizada de vinhaça demonstra que essa técnica promoveu melhorias substanciais nas propriedades físico-químicas e biológicas do solo, favorecendo o desenvolvimento da microbiota do ambiente. Foi observado um incremento na atividade microbiana do solo, com destaque para a presença de microrganismos benéficos, como bactérias fixadoras de nitrogênio e solubilizadoras de fósforo e potássio. Esses organismos desempenham um papel importante na manutenção da saúde do solo e no suporte às funções para o desenvolvimento das plantas.

Os resultados revelaram que fatores sazonais têm impacto significativo na eficácia da fertirrigação com vinhaça, indicando a necessidade de ajustar a aplicação em função das condições climáticas regionais para maximizar os benefícios. Assim, o uso de vinhaça como fertilizante localizado surge como uma alternativa sustentável, reduzindo a dependência de insumos químicos e promovendo práticas agrícolas alinhadas com a sustentabilidade econômica e ambiental.

A fertirrigação localizada de vinhaça, se aplicada na quantidade correta, pode estimular a vida microbiana, selecionando microrganismos que se adaptem às concentrações de macro e micronutrientes nos canaviais garantindo a preservação da qualidade do solo a longo prazo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effect of environmental condition, such as pH on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 23, n. 3, p. 393-395, 1993. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90140-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90140-7). Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071793901407>. Acesso em: 06 nov 2024.

BALD, D. R.; RANGEL, C. P.; VARGAS, A.; GIRÃO, K. T.; PASSAGLIA, L. M. P. Microbiota do solo: a diversidade invisível e a sua importância. **Bio Diverso**, v. 1, n. 1, p. 101-131, 2021. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/biodiverso/article/view/120742/65552>. Acesso em: 30 ago 2023.

BARBOSA, J. C.; MALDONADO JR., W. **AgroEstat**: sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos. Versão 1.0. Jaboticabal: Departamento de Ciências Exatas, 2010.

BATISTA, S. B.; SILVA, S. E. Quantificação e isolamento de actinobactérias do solo adicionado com vinhaça. **Connectionline**, n. 29, p. 60-72, 2022. DOI:10.18312/connectionline.v0i29.2212. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/371272599_QUANTIFICACAO_E_ISOLAMENTO_DE_ACTINOBACTERIAS_DO_SOLO_ADICIONADO_COM_VINHACA. Acesso em: 12 mar 2025.

BEBÉ, F. V.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R.; SILVA, GEORGE, B.; OLIVEIRA, V. S. Avaliação de solos sob diferentes períodos de aplicação com vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 6, p. 781-787, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000600017>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/9yssrwcKQRBs6x8VZCbLgPg/>. Acesso: 26 set 2024.

BRIDHIKITTI, A.; KAEWSUK, J.; KARAKET, N.; FRIEND, R.; SALLACH, B.; CHONG, J. P. J.; REDEKER, K. R. Balancing agriculture and industry through waste utilization for sugarcane sustainability. **Sustainability**, v. 15, n. 14711, p. 1-26, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su152014711>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/20/14711>. Acesso em: 11 fev 2025.

CARDIN, C. A. **Atributos químicos e físicos do solo cultivado com cana de açúcar, com e sem aplicação de vinhaça, colhida de forma manual e mecanizada, oeste paulista. Presidente Prudente, SP**. Orientador: Carlos Henrique dos Santos. 2014. 70p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente – SP. 2014. Disponível em: <http://bdtd.unoeste.br:8080/tede/handle/tede/596>. Acesso em: 22 jan 2025.

CANEI, A. D.; HERNÁNDEZ, A. G.; MORALES, D. M. L.; DA SILVA, E. P.; SOUZA, L. F.; LOSS, A.; LOURENZI, C. R.; DOS REIS, M. S.; SOARES, C. R. F. S. Atributos microbiológicos e estrutura de comunidades bacteriana nas como indicadores da qualidade do solo em plantios florestais na mata atlântica. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 4, p. 1405-1417, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509835049>. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/35049#:~:text=A%20atividade%20da%20enzima%20CE%20glucosidase%20e%20da%20fosfatase,diverg%C3%Aancia%20entre%20as%20C3%A1reas%20de%20pinus%20e%20arauc%C3%A1ria>. Acesso em: 08 jan 2025.

CARDOSO, E. N. L. **Impactos da aplicação da vinhaça por longo período em solos de textura argilosa e arenosa. Jaboticabal, SP.** Orientadora: Carolina Fernandes. 2021. 37p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do solo) – Universidade Estadual Paulista, Campus Jaboticabal – SP. 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/07496944-72dc-4efb-81f6-cb6950dac8b2/content>. Acesso em: 04 mai 2024.

CARPANEZ, T. G.; MOREIRA, V. R.; ASSIS, I. R.; AMARAL, M. C. S. Sugarcane vinasse as organo-mineral fertilizers feedstock: Opportunities and environmental risks. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 832, n. 154998, p. 1-14, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154998>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35390364/>. Acesso em: 07 fev 2025.

CASIDA, L.E.; KLEIN, D.A.; SANTORO, T. Soil dehydrogenase activity. **Soil Science**, [s. l.], v. 98, p. 371-376, 1964. DOI: <https://10.1097/00010694-196412000-00004>. Disponível em: https://journals.lww.com/soilsci/citation/1964/12000/soil_dehydrogenase_activity.4.aspx. Acesso em: 17 jun 2023.

CHAER, G. M.; MENDES, I. C.; DANTAS, O. D.; MALAQUIAS, J. V.; REIS JUNIOR, F. B.; OLIVEIRA, M. I. L. Evaluating C trends in clayey Cerrado Oxisols using a four-quadrant model based on specific arylsulfatase and β -glucosidase activities. **Applied Soil Ecology**, [s. l.], n. 183, p. 1-11, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104742>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139322003584>. Acesso em: 04 abr 2024.

CHRISTOFOLETTI, C. A.; ESCHER, J. P.; CORREIA, J. E.; MARINHO, J. F. U.; FONTANETTI, C. S. Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. **Waste Management**, [s. l.], n. 33, p. 2752-2761, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X1300408X#:~:text=Some%20negative%20environmental%20aspects%20in,soil%20compaction%20caused%20by%20heavy>. Acesso em: 25 abr 2024.

CINTRA, P.; MACHADO, R.; ARRIEL, F. H.; OLIVEIRA, H. F. E.; LOUREIRO, F. A. S.; OLIVEIRA, A. P. S.; RABELO, K. C. C. Crescimento, qualidade industrial e balanço de nutrientes de cultivares de cana-de-açúcar sob adubação no Cerrado. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 9, n. 12, p. 1-26, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i12.11117>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/348043662_Crescimento_qualidade_industrial_e_balanco_de_nutrientes_de_cultivares_de_cana-de-acucar_sob_adubacao_no_Cerrado. Acesso em: 07 fev 2024.

COPAM, CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL. **Deliberação Normativa COPAM nº 184, de 13 de junho de 2013.** Belo Horizonte, 2013. Disponível

em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=27535>. Acesso em: 06 set 2024.

COSTA, M. S.; ROLIM, M. M.; SILVA, G. F. DA; SIMÕES NETO, D. E.; PEDROSA, E. M. R. Nutrient content and accumulation in sugarcane under mineral fertilization and high doses of vinasse. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 42, n. 2, p. 565-582, 2021. DOI: <https://10.5433/1679-0359.2021v42n2p565>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/350665620_Nutrient_content_and_accumulation_in_sugarcane_under_mineral_fertilization_and_high_doses_of_vinasse. Acesso em: 19 nov 2023.

COSTA, M. S.; ROLIM, M. M.; SILVA, G. F.; SANTOS JÚNIO, J. A.; PEDROSA, E. M. R. Chemical attributes of an ultisol cultivated with sugarcane after application of high doses of vinasse. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 36, n. 2, p. 402-413, 2023. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252023v36n217rc>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rcaat/a/xVPpQwhd8Vt9GKPQTTB8gxp/>. Acesso em: 19 mar 2024.

DEL GOBBO, L. M.; VILLEGAS, L. B.; COLIN, V. L. The potential application of an autochthonous fungus from the northwest of Argentina for treatment of sugarcane vinasse. **Journal of Hazardous Materials**, v. 365, n. 5, p. 820-826, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.11.071>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389418311002>. Acesso em: 08 fev 2025.

FERREIRA, E. P. DE B.; STONE, L. F.; MARTIN-DIDONET, C. C. G. População e atividade microbiana do solo em sistema agroecológico de produção. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 48, n. 1, p. 22-31, 2017. DOI: <https://10.5935/1806-6690.20170003>. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/151815/1/CNPAF-2017-rca.pdf>. Acesso em: 26 nov 2023.

FERREIRA, T. M.; SOTO, M. A. A.; CHANG, H. K. Avaliação da aplicação de vinhaça em solo arenoso da Formação Rio Claro. **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 3, p. 354-363, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v32i3.29208>. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29208>. Acesso em: 30 nov 2023.

FREITAS, A. M.; CABRAL FILHO, F. R.; ANDRADE, C. L. L.; TEIXEIRA, M. B.; ALVES, D. K. M.; SILVA, E. C. Análise econômica da fertirrigação da vinhaça comparada com o potássio na cultura do milho. **Brazilian Journal of Science**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 24-32, 2023. DOI: <https://10.14295/bjs.v2i3.261>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/367321865_Analise_economica_da_fertirrigacao_da_vinhaca_comparada_com_o_potassio_na_cultura_do_milho. Acesso em: 22 abr 2024.

GASPAROTTO, F.; SILVA, M. T.; WATANABE, A. Y. M.; MARTINS, G. M.; DA SILVA, C. N.; SCHMIDT FILHO, E. Setor sucroenergético e estratégias microbiológicas para mitigação dos impactos ambientais da aplicação da vinhaça. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 1, p. 241-251, 2019. DOI:

10.6008/CBPC2179-6858.2019.001.0020. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/336128200_Setor_sucroenergetico_e_estrategias_microbiologicas_para_mitigacao_dos_impactos_ambientais_da_aplicacao_da_vinhaca.
 Acesso em: 02 mar 2025.

HOARAU, J.; CAROA, Y.; GRONDINA, I.; PETITA, T. Sugarcane vinasse processing: Toward a status shift from waste to valuable resource. A review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 24, p. 11-25, 2018. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.05.003>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714418300163>. Acesso em: 12 fev 2024.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE - Manual técnico de pedologia: Guia prático de campo**. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em:
<http://pt.scribd.com/document/305768716/Manual-Tecnico-de-Pedologia-Guia-Pratico-de-Campo>. Acesso em: 20 jan. 2024.

JONGE, V. **Avaliação da atividade enzimática em solos quimicamente equivalentes e com diferentes produtividades**. Ponta Grossa, PR. Orientadora: Simone Delezuk Inglez. 2022. 116p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa – PR. 2022. Disponível em:
<https://www.abq.org.br/cbq/2021/trabalhos/5/24022-28817.html>. Acesso em: 12 jan 2025.

LACERDA, V. O.; MAPELI, A. M. Efeitos da sazonalidade sobre a fenologia e a fisiologia de *Parkia platycephala* Benth (Fabaceae, Caesalpinioideae) em área de Cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 31, n. 3, p. 1344-1363, 2021. DOI:
<https://doi.org/10.5902/1980509839111>. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/cflo/a/3vwhppwBtBtTkHN8KxDwTCB/>. Acesso em: 20 mar 2024.

LIMA, C. G. R.; CARVALHO, M. P.; MONTANARI, R.; DUARTE, A. A.; CAMPOS, S. N. Variabilidade e correlação espacial entre atributos tecnológicos da cana-de-açúcar com o pH do solo. In: IV Simpósio de Geoestatística em Ciências Agrárias – SGeA, 2015. Botucatu. **Anais [...]** Botucatu: UNESP, 2015, p. 1-6. DOI:10.12702/IV-SGEA-a08. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/300484824_Variabilidade_e_Correlacao_Espacial_entre_Atributos_Tecnologicos_da_Cana-de-Acucar_com_o_pH_do_Solo. Acesso em: 04 out 2024.

LIMA, C. DE S.; DALZUCHIO, M. S.; DA SILVA, E. F.; PÉRICO, E. Macrofauna edáfica e sua relação com sazonalidade em sistema de uso do solo, bioma cerrado. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 1-13, 2020. DOI:
<https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.002.0001>. Disponível em:
<https://sustenere.inf.br/index.php/rca/article/view/CBPC2179-6858.2020.002.0001/1926>. Acesso em: 08 ago 2023.

LUZ, F. B.; GONZAGA, L. C.; CHERUBIN, M. R.; CASTIONI, G. A. F.; CARVALHO, J. L. N. Soil health impact of long- term sugarcane vinasse recycling. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 18, n. 6, p. 2067-2077, 2024. DOI:

<https://doi.org/10.1002/bbb.2688>. Disponível em:
<https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/bbb.2688>. Acesso em: 06 fev 2025.

MARTIN, J. P. Use of acid, rose bengal, and estreptomycin in the plate method for estimating soil fungi. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 69, p. 215-232, 1950. DOI: <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-195003000-00006>. Disponível em: https://journals.lww.com/soilsci/citation/1950/03000/use_of_acid,_rose_bengal,_and_streptomycin_in_the.6.aspx. Acesso em: 05 mai 2023.

MEHLICH, A. Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄ by North Carolina. **Soil Testing Laboratories**. Raleigh, University of North Carolina, 1953.

MENDONÇA, E. D. S.; MATOS, E. D. S. **Matéria Orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa: UFV, 2005

MONTIEL-ROSALES, A.; MONTALVO-ROMERO, N.; GARCÍA-SANTAMARÍA, L. E.; SANDOVAL-HERAZO, L. C.; BAUTISTA-SANTOS, H.; FERNÁNDEZ-LAMBERT, G. Post-Industrial Use of Sugarcane Ethanol Vinnasse: A Systematic Review. **Sustainability**, v. 14, n. 11635, p. 1-25, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141811635>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/18/11635>. Acesso em: 25 mai 2024.

MUNDIM, D. A.; BONOMO, R.; PIRES, F. R.; DE SOUZA, J. M. Atributos físico-hídricos e químicos do solo sob aplicação de vinhaça. **Energia na Agricultura**, v. 33, n. 4, p. 321-329, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.17224/EnergAgric.2018v33n4p321-329>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/332165848_ATRIBUTOS_FISICO-HIDRICOS_E_QUIMICOS_DO_SOLO_SOB_APLICACAO_DE_VINHACA_POR_ANOS_CONSECUTIVOS. Acesso em: 29 dez 2024.

NASCIMENTO JÚNIOR, L. F.; SILVA, P. C.; BARBOSA, K. de P.; CAVALCANTE, T. J.; RODRIGUES, A. A.; VITAL, R. G. Propriedades físicas do solo cultivado com cana-de-açúcar sob aplicação de vinhaça. **Revista ESPACIOS**, [s. l.], v.38, n. 39, p. 22-32, 2017. Disponível em: <https://www.revistaespacios.com/a17v38n39/a17v38n39p22.pdf>. Acesso em: 06 mai 2023.

OLIVEIRA, P. V. P.; DAMIANI, G. V. Tratamento da vinhaça de cana de açúcar com *Bacillus subtilis* durante 72 horas. **Brazilian Journal of Development**, v. 10, n. 1, p. 1012-1020, 2024. DOI:10.34117/bjdv10n1-066. Disponível em: <https://journalseeker.researchbib.com/view/issn/2525-8761>. Acesso em: 11 abr 2024.

OLIVEIRA, R. C.; MORAIS, M. R.; DE FREITA, C. M.; ROVIERO, J. P.; NOMURA, M.; ASMAR, S. A.; DE OLIVEIRA, M. C.; SILVA, B. DE J. Agricultura de precisão na análise de solo em cana-de-açúcar: um comparativo anual. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 7, p. 01-19, 2024. DOI: 10.55905/oelv22n7-006. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Agricultura-de-precis%C3%A3o->

na-an%C3%A1lise-de-solo-em-um-Oliveira-Morais/39daf7734692e07ce5cd3ade4ccd7d26b42d941a. Acesso em: 04 dez 2024.

OLSEN, R. A.; BAKKEN, L. R. Viability of soil bacteria: optimization of plate counting technique and comparison between total counts and plate counts within different size groups. **Microbial Ecology**, [s. l.], v.13, p. 59-74, 1987. Disponível em: <http://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24213103/>. Acesso em: 06 abr 2023.

PERIN, L.; VIEIRA, E.; ANDRADE, V.; SANTOS, T.; ARAÚJO-PIOVEZAN, T.; MENEZES, B.; MENEZES, V.; DANTAS, J. Efeitos da monocultura e aplicação de vinhaça sobre os atributos químicos, físicos e biológicos do solo em área de cultivo de cana-de-açúcar em Sergipe, Brasil. **Agroecologia: métodos e técnicas para uma agricultura sustentável**, v. 3, p. 133-164, 2021. DOI:10.37885/210203309. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/350851353_EFEITOS_DA_MONOCULTURA_E_APLICACAO_DE_VINHACA_SOBRE_OS_ATRIBUTOS_QUIMICOS_FISICOS_E_BIOLOGICOS_DO_SOLO_EM_AREA_DE_CULTIVO_DE_CANA-DE-ACUCAR_EM_SERGIPE_BRASIL. Acesso em: 16 dez 2024.

PINA, J. C.; BONO, J. A. M.; OLIVEIRA, A. K. M.; RUFINO, R. S.; AMORIM, D. O. Organic residues on rooting and yield of sugarcane in Typic Quartzipsamments soil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 7, p. 650-655, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n7p650-655>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/yKGx6crcH7k3wWmL8dgzjvr/?lang=en>. Acesso em: 28 set 2023.

PINTO, L. E. V.; CORDEIRO, C. F. S.; ARAÚJO, A. S. F.; ARAÚJO, F. F. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 26, n. 5, p. 335-340, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n5p335-340>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/JZg4XpsFzYvVrjfSvykfNrD/>. Acesso em: 28 jan 2024.

POSSIGNOLO, N. V.; BERTONCINI, E. I.; VITTI, A. C. Decomposition of the organic matter of natural and concentrated vinasse in sandy and clayey soils. **Water Sci Technology**, v. 76, n. 3-4, p. 728-738, 2017. DOI: 10.2166/wst.2017.239. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28759455/>. Acesso em: 22 fev 2025.

PURCENA, L. L. A. **Prospecção de enzimas de solo de Cerrado sob cultivo de cana-de-açúcar. Goiânia, GO**. Orientadora: Kátia Flávia Fernandes. 2014. 106p. Tese (Doutorado em Biologia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia - GO. 2014. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tedeserver/api/core/bitstreams/f603d58d-9024-483b-ab58-45f37ee9927e/content>. Acesso em: 09 mai 2024.

RAIJ, B.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas, Instituto Agrônômico, 285p. 2001. Disponível em: https://lab.iac.sp.gov.br/Publicacao/Raij_et_al_2001_Metod_Anal_IAC.pdf. Acesso em: 20 mai 2025.

RODRIGUES, D. H. S.; ABESB, S. DA SILVA; STEINER, F.; VIANA, R. DA S.; ALVES, R. S. Uso de Bactérias Solubilizadoras de Fosfato para Potencializar o Crescimento de Variedades de Cana-de-Açúcar. **Ensaio e Ciências**, v. 27, n. 3, p. 254-260, 2023. DOI: <https://doi.org/10.17921/1415-6938.2023v27n3p254-26>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/378569249_Uso_de_bacterias_solubilizadoras_de_fosfato_para_potencializar_o_crescimento_de_variedades_de_cana-de-acucar. Acesso em: 26 jul 2024.

ROCHA, A. F. B. **Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroecológicos no Cerrado Mineiro. Uberlândia, MG**. Orientadora: Ana Carolina Silva Siquieroli. 2021. 46p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Qualidade Ambiental) – Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais – MG. 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/32517>. Acesso em: 05 mai 2024.

SANTOS, G. M.; DE FRANÇA, L. R. **GEEA: Grupo de Estudos Estratégicos Amazônicos Tomo XI**. Editora INPA. Manaus, v. 11, p. 46, 2018.

SERAFIM, R. F.; YABUKI, L. N. M.; QUELUZ, J. G. T.; GALDEANO, L. R.; GARCIA, M. L. Efeitos da aplicação de vinhaça na fertilidade do solo. **Irriga**, v. 26, n. 2, p. 439-459, 2021. DOI:10.15809/irriga.2021v26n2p439-459. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/356393612_EFEITOS_DA_APLICACAO_DE_VINHACA_NA_FERTILIDADE_DO_SOLO. Acesso em: 25 jan 2025.

SILVA, G. S. P. L.; SILVA, F. C.; ALVES, B. J. R.; TOMAZ, E.; BERTON, R. S.; MARCHIORI, L. F. S.; SILVEIRA, F. G. S. Efeitos da aplicação de vinhaça “*in natura*” ou concentrada associada ao n-fertilizante em soqueira de cana-de-açúcar e no ambiente. **Holos Environment**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 1-21, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/holos.v19i1.12212>. Disponível em: <https://www.ceau-unesp.org.br/holos/article/view/12212>. Acesso em: 24 fev 2024.

SORHEIM, R.; TORSVIK, V. L.; GOKSOYR, J. Phenotypical divergences between populations of soil bacteria isolated on different media. **Microbial Ecology**, v. 17, p. 181-192, 1989. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/4251047>. Acesso em: 15 mar 2024.

STEPHEN, G. S.; SHITINDI, M. J.; BURA, M. D.; KAHANGWA, C. A.; NASSARY, E. K. Harnessing the potential of sugarcane-based liquid byproducts—molasses and spentwash (vinasse) for enhanced soil health and environmental quality. A systematic review. **Frontiers in Agronomy**, v. 6, n. 1358076, p. 1-16, 2024. <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1358076>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/agronomy/articles/10.3389/fagro.2024.1358076/full>. Acesso em: 18 fev 2025.

TAVARES, V. DO N.; DA SILVA, I. J. S.; ROLIM NETO, F. C.; PARAHYBA, R. DA B. V.; MENEZES, R. S. C.; CORREA, M. M.; DE ARAÚJO, M. DO S. B. Influência da vinhaça e colheita mecanizada nos aspectos físicos e químicos do solo no município de Paudalho – PE. **Sociedade & Natureza**, v. 36, n. 69886, p. 1-13, 2024. DOI: 10.14393/SN-

v36-2024-69886. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/sn/a/kwnvN8gpZCnJTGbq6mZvwBD/>. Acesso em: 08 mar 2024.

TECON, R.; OR, D. Biophysical processes supporting the diversity of microbial life in soil. **Microbiology Reviews**, [s. l.], v. 41, p. 599-623, 2017. Disponível em:
<http://academic.oup.com/femsre/article/41/5/599/4082850>. Acesso em: 15 mar. 2024.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análises de solo**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017. Disponível em:
<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>. Acesso em: 26 jul 2023.

YANG, S.D.; LIU, J. X.; WU, J.; TAN, H. W.; LI, Y. R. Effects of vinasse and press mud application on the biological properties of soils and productivity of sugarcane. **Sugar Tech**, v. 15, n. 2, p. 152–158, 2013. DOI 10.1007/s12355-012-0200-y. Disponível em:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12355-012-0200-y>. Acesso em: 22 fev 2025.

ZAMARREÑO, A. M.; VALDUGA, G.; GARCIA-MINA, J. M. Cane vinasses contain bioactive concentrations of auxin and abscisic acid in their composition. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 9976, p. 1-5, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms23179976>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36077383/>. Acesso em: 14 dez 2023.

CAPÍTULO 4 – PARALELO ENTRE A BIOMETRIA E METABOLÔMICA DA CANA-DE-AÇÚCAR APÓS A APLICAÇÃO DE VINHAÇA LOCALIZADA

RESUMO

A fertirrigação localizada de vinhaça tem se mostrado uma tecnologia promissora, permitindo a aplicação homogênea de vinhaça ao longo das linhas de plantio, reduzindo riscos ambientais e otimizando o uso de recursos hídricos e nutrientes. A escolha da variedade de cana-de-açúcar é crucial para a produtividade e sustentabilidade do cultivo. A CTC 9002, por exemplo, apresenta alto rendimento e adaptabilidade a diferentes condições climáticas, mas ainda é pouco difundida no Cerrado de Minas Gerais, onde outras variedades são preferidas. Para avaliar o desempenho dessa variedade, técnicas como biometria e metabolômica são empregadas. A biometria analisa características físicas da planta, como altura e diâmetro do colmo, enquanto a metabolômica identifica e quantifica metabólitos envolvidos no crescimento, defesa e qualidade nutricional. Este estudo teve como objetivo comparar as características biométricas e metabolômicas da CTC 9002 em áreas submetidas à fertirrigação localizada e em áreas de controle, visando compreender os impactos dessa prática no desenvolvimento da planta e na eficiência produtiva. Os resultados mostraram que com o manejo irrigado com vinhaça localizada a cana-de-açúcar se desenvolveu, nos aspectos de crescimento da planta, alta concentração de compostos tecnológicos da cana e na avaliação biométrica. No perfil metabolômico, a análise de RMN e o perfil quimiométrico também apresentaram resultados positivos e conclusivos que a fertirrigação forneceu perfis metabólicos que ao serem assimilados desde as etapas iniciais de crescimento, apresentou plantas que aos 3 meses já haviam desenvolvido todos os compostos de uma planta adulta.

Palavras-Chaves: biometria, fertirrigação localizada, metabolômica vinhaça.

ABSTRACT

Localized fertigation with vinasse has proven to be a promising technology, enabling the uniform application of vinasse along planting rows, reducing environmental risks, and optimizing the use of water and nutrients. The choice of sugarcane variety is critical to crop productivity and sustainability. CTC 9002, for instance, exhibits high yield potential and adaptability to various climatic conditions, yet it remains underutilized in the Brazilian savannah region of Minas Gerais, where other cultivars are more commonly adopted. To assess the performance of this variety, techniques such as biometry and metabolomics are employed. Biometric analysis evaluates physical traits of the plant, such as stalk height and diameter, while metabolomics identifies and quantifies metabolites involved in plant growth, defense mechanisms, and nutritional quality. The objective of this study was to compare the biometric and metabolomic characteristics of CTC 9002 grown in areas under localized vinasse fertigation and in control areas, aiming to understand the impact of this practice on plant development and production efficiency. The results demonstrated that under localized vinasse irrigation, sugarcane showed enhanced growth, higher concentrations of technological compounds, and improved biometric performance. In the metabolomic profile, NMR analysis and chemometric profiling also presented positive and conclusive outcomes, indicating that fertigation produced metabolic profiles that, when assimilated during early growth stages, resulted in plants that, by three months, had already developed all compounds typical of a mature plant.

Keywords: Biometric. Metabolomic. Localized fertigation. Vinasse.

1. INTRODUÇÃO

Com a expansão da indústria sucroalcooleira, as áreas de canaviais brasileiros colhidas na safra 2024/202 somaram cerca de 8,33 milhões de hectares, dando ao Brasil o título de maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com produção de 700 milhões de toneladas (CONAB, 2025). O Estado de Minas Gerais apresenta grande importância no cultivo da cana-de-açúcar, atualmente com produção aproximada de 81,3 milhões de toneladas, ficando atrás dos Estados de São Paulo, 387,6 milhões de toneladas (COSTA *et al.*, 2019; CONAB, 2025).

Considerando apenas o etanol oriundo da cana, foram produzidos cerca de 29 bilhões de litros no biênio 2024/2025, segundo a CONAB (2025). No entanto, essa produção gera uma vasta quantidade de subprodutos com alta carga orgânica, como 290 bilhões de litros de vinhaça, rica em nutrientes e praticamente utilizada quase em sua totalidade como biofertilizante nas lavouras do Brasil (Wheeler *et al.*, 2021). A disponibilização destes nutrientes e água contidos nela são importantes, pois facilitam a distribuição e a qualidade na aplicação junto à linha de plantio da cana, em comparação às metodologias tradicionais de irrigação e adubação (Silva *et al.*, 2023).

Contudo, novas tecnologias vêm sendo empregadas, como a fertirrigação localizada, possibilitando a aplicação de forma homogênea ao longo das linhas da cultura, sendo mais eficiente se comparada ao uso de canhões aspersores, diminuindo o risco ambiental e localizando a distribuição. Além de irrigar e favorecer a brotação da soqueira, a vinhaça serve como solvente para outros produtos, além de ser fonte de potássio, nitrogênio, cálcio e compostos orgânicos, o que gera redução do uso de fertilizantes químicos e facilita operações agrícolas como transporte, aplicação e irrigação, consolidando o trato e a fertilização no solo (Biotrop, 2022).

Através desses dados, a escolha da variedade de cana-de-açúcar é um fator importante para a produção de açúcar e etanol, e ganho do produtor, sendo que, as variedades possuem características morfológicas distintas que afetam a produtividade, uso de recursos naturais (como irrigação e fertilizantes), resistência a pragas e doenças e qualidade do produto final (Oliva, Jacometti, 2023). A CTC 9002 possui alto rendimento e taxa de crescimento rápido e adaptabilidade a diferentes condições de solo e clima, no entanto sua

plantação e distribuição ainda não é tão difundida pelos produtores que habitam o Cerrado de Minas Gerais (Machado Júnior *et al.*, 2024).

Para entender mais sobre essa variedade de cana pode-se utilizar os conceitos da biometria, que analisa características físicas e comportamentais dos seres vivos. Em plantas como a cana-de-açúcar, esses dados são utilizados para compreender o desenvolvimento e maturação da planta, geralmente próximo ao período de sua colheita (Arcoverde; Santos, 2020; Roviero *et al.*, 2023).

A análise metabolômica objetiva verificar a presença dos principais metabólitos qualitativa e quantitativamente num organismo, em determinado momento da sua vida. Essas moléculas são essenciais nos processos biológicos de crescimento, agindo nos sinais celulares, macro e micronutrientes captados para o crescimento, agentes de defesa contra estresses ambientais, desenvolvimento e qualidade nutricional das plantas, entre outros (Yuan *et al.*, 2022).

Com isso, objetivou-se avaliar e comparar as características biométricas e os compostos metabolômicos da variedade de cana CTC 9002 comparando uma área submetida a fertirrigação localizada a uma área não fertirrigada (controle).

2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram selecionadas duas áreas de cultivo de cana-de-açúcar da variedade CTC 9002 no município de Frutal-MG, uma fertirrigada com vinhaça localizada, área (P1) localizada a -20,081293 de latitude sul e -49,193704 de longitude oeste possuindo um total de 21,15 ha e (P2) localizada a -20,069807 de latitude sul e -49,194761 de longitude oeste possuindo um total de 10 ha, área de controle, ambas áreas são formadas por Latossolo Vermelho distrófico típico. Todas as áreas possuem 1,5 m de espaçamento entre as fileiras no canavial.

A Figura 1 mostra os pontos no mapa da área experimental. A área destinada ao experimento estava em consórcio de plantação com o cultivo de soja há quatro anos, com um sistema de sucessão sem revolvimento do solo.

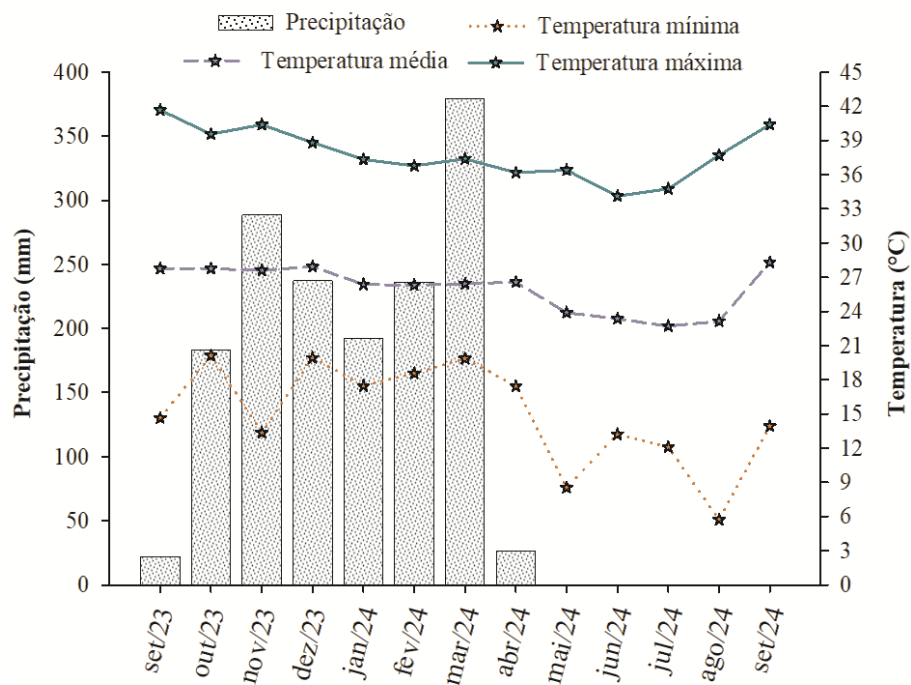


Figura 2 – Temperatura e precipitação ao longo do ano na área do experimento
Fonte: Elaboração própria, 2025.

As etapas do experimento se desenvolveram segundo o fluxograma da Figura 3 com três coletas de folhas e uma colheita de plantas adultas antes da colheita pelo produtor.

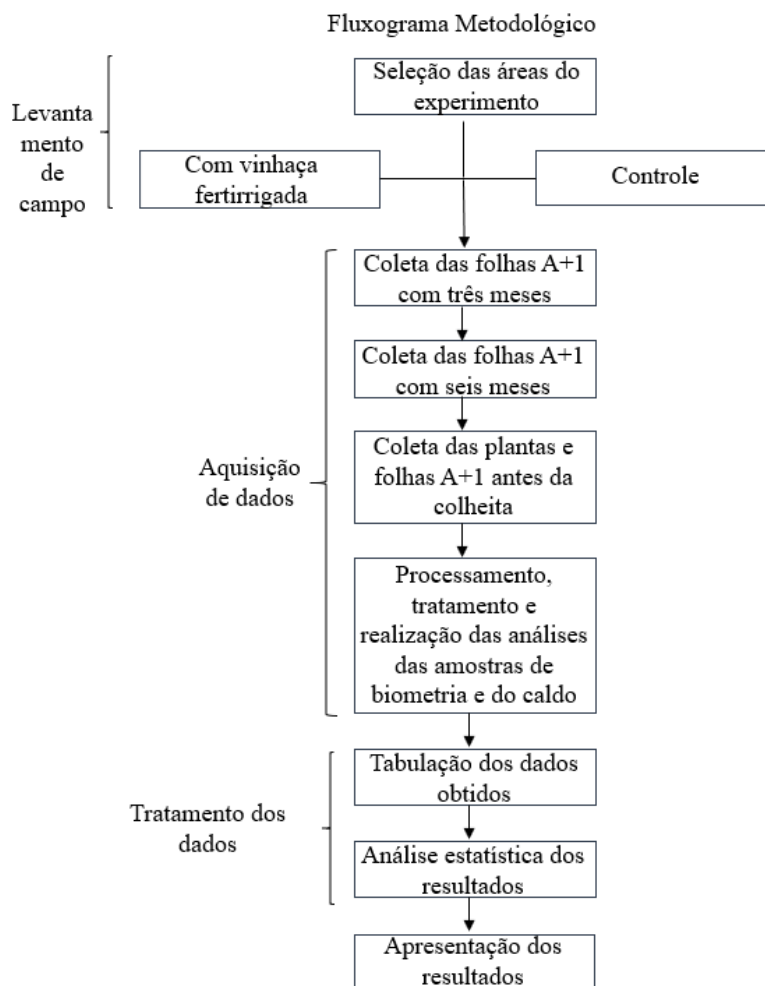


Figura 3 –Etapas do experimento de análises biométricas e metabolômicas da cana.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

As áreas do experimento nunca haviam passado por tratamento no solo, em todas as áreas sempre foram realizadas colheitas mecanizadas. Na Tabela 1 pode-se observar as doses de vinhaça e demais compostos que foram acrescidos no momento da fertirrigação localizada das áreas.

Tabela 1 – Dados sobre a fertirrigação localizada nas áreas de pesquisa.

Total da área de estudo em ha.	21,15
Volume de vinhaça aplicado em ha.	56,07
Vazão da vinhaça em ha.	8,58
Quantidade de N (kg/ha.)	29,70

Quantidade de K ₂ O (kg/ha.)	135
Ureia (20% do volume aplicado da vinhaça) em kg/ha.	11,21

Fonte: Elaboração própria, 2025.

O plantio ocorreu no dia 02 de junho de 2023, a fertirrigação no dia 17 e 18 de julho de 2023 e as colheitas um ano após o plantio. Ao fim de cada período, foram coletadas manualmente 50 amostras de cana-de-açúcar em cada área pesquisada para realizar análises de biometria e metabólica das plantas.

2.1. Análise biométrica da cana

Para análise biométrica avaliaram-se 50 colmos de canas-de-açúcar segundo a metodologia de Marafon (2012), verificou *in loco* os valores do: número de folhas secas aderidas ao colmo (NFS), número de folhas verdes aderidas ao colmo (NFV); comprimento da folha +3 (CF3), largura do terço médio (LTM), comprimento do colmo (CMC) que é distância do nível do solo à interseção da folha bandeira; comprimento do palmito (CP), diâmetro da base do colmo (DBC), diâmetro da ponta do colmo (DPC), número de nós (NN), número de entrenós (NE), contagem de perfilhos em 10 touceiras (P10), Brix da base e da ponta (%) para determinar o índice de maturação(IM).

Foram colhidas 50 plantas em pontos aleatórios de cada área criando um grupo amostral para cada tratamento. As amostras foram encaminhadas para os laboratórios da Universidade do Estado de Minas Gerais, Unidade Frutal - MG (UEMG Frutal), onde foram determinados os seguintes aspectos: peso de 10 colmos que foram pesados antes (P10C) e colocados para secar por um período de 15 dias a 70°C e pesados depois (PCD), pesou a massa fresca de 10 folhas A+1 (MFA) e as colocou para secar por um período de 48 horas por 40°C, pesando novamente para obter a massa seca (MFD).

2.2. Análise tecnológica do caldo

O caldo foi extraído por moagem, coado e analisou-se os seguintes parâmetros segundo (CTC, 2005): teor de Brix em refratômetro (B), acidez sulfúrica (ASC), pH (pHC), açúcar redutor total (ART), TCH (tonelada de colmo por hectare), TBH (tonelada de brix por

hectare). Já os compostos fenólicos do caldo (Fen) foram determinados pela metodologia de Folin; Ciocalteu (1927).

Os valores das quantidades de sacarose (S), glicose (G), frutose (F) e sacarose no Brix (SX) foram determinados pela metodologia de Silva (2017).

2.2.1. Análise de pH do caldo (pHC)

Para medir o potencial hidrogeniônico foram medidos 50 mL do caldo extraído em proveta que foram transferidos para um béquer de 100 mL, com auxílio de bastão de vidro, realizou o processo de homogeneização por aproximadamente 1 min. O pH foi mensurado no aparelho peagomêtro Aquaseacher modelo a-AB33M1 da marca Ohaus.

2.2.2. Análise do Brix (B)

Coou o caldo, empregando-se algodão hidrófilo em funil de vidro de haste longa, coletou o filtrado em béquer de 250 mL, com o auxílio de uma pipeta de Pasteur, gotejou duas gotas no primeiro prisma do refratômetro da marca Milwaukee. Encostou o 2º prisma sobre o caldo, retirando o protetor de luz existente no aparelho. Girou o espelho de forma a direcionar melhor os raios luminosos, o que se observa através de uma melhora na visualização do campo.

Em seguida, girou o botão de compensação até que a linha divisória entre os campos claros e escuro se posicione exatamente na parte mediana. (Ponto de cruzamento das linhas que formam o X aí presente) do campo de observação. Fez-se a leitura através da lente de aumento a % de sólidos solúveis, no caldo, no ponto de a escala indicado pela linha de demarcação do aparelho.

2.2.3. Análise da acidez sulfúrica total do caldo (ASC)

Pipetou 2 ml do caldo extraído em um Erlenmeyer de 250 mL, adicionou 100 mL de água destilada e homogeneizou, acrescentou 3 gotas da solução indicadora de fenolftaleína 1% e titulou com a solução de hidróxido de sódio 0,05 N até a coloração levemente rósea.

A acidez sulfúrica foi determinada de acordo com a seguinte equação:

$$\text{Acidez sulfúrica (gH}_2\text{SO}_4\text{/L)} = V * 1,225$$

Em que:

V= volume gasto na titulação (mL)

2.2.4. Análise de Fenol (Fen)

Diluiu-se 0,5 ml do caldo extraído em 4,5 mL de água destilada, pegou 0,5 mL dessa diluição e transferiu para um tubo de ensaio juntamente com 2,5 mL de solução de Folin diluída 10 vezes, mais 2 mL de carbonato de sódio a 7,5%. Incubou em banho-maria a 45°C por 15 minutos. Efetuou-se a leitura em espectrofotômetro UV-Vis da Shimadzu, modelo 1800 a 765 nm, usou água destilada como branco. Os resultados obtidos após a espectrofotometria, multiplicar por 20, sendo os valores expressos em mg/L de compostos fenólicos.

2.2.5. Determinação de açúcar redutor total (Metódo DNS) (ART)

Diluiu 0,1 ml do caldo extraído em 9,9 mL de água destilada, transferiu-se 2 mL desta solução diluída para um tubo de ensaio, adicionou 2 mL de HCl a 2 N. Incubou em banho-maria por 100°C por 10 minutos. Retirou a amostra do banho, esperou esfriar e adicionou 2 ml de NaOH a 2 mol/L, homogeneizou novamente, adicionou 1 mL do reagente de cor DNS e realizou nova homogeneização. Incubou-se por 6 minutos a 100°C. Resfriou-se a amostra em banho de gelo, adicionou 8 ml de água destilada e fez-se a leitura em espectrofotômetro UV-Vis da Shimadzu, modelo 1800 a 540 nm (Miller, 1959).

Com o valor da absorbância, calculou-se a concentração dos açúcares redutores totais a partir dos seguintes cálculos:

Equação da curva padrão:

$$\text{Concentração de ART: } \frac{(\text{Absorbância obtida} - 0,0184)}{0,421}$$

Após calcular a equação da curva, aplicar a seguinte fórmula para determinar a quantidade em %:

$$\text{ART em \%: } (((\text{Concentração ART} * 100) * 3) / 10)$$

Em que:

x 100: fator de diluição do caldo

x 3: fator de diluição do HCl e NaOH

/ 10: concentração em %

2.2.6. Análise do teor de carboidratos: sacarose no Brix (SX), glicose (G), frutose (F) e sacarose (S)

O caldo extraído foi caracterizado quanto ao teor de carboidratos, glicose, frutose e sacarose a partir da leitura das alíquotas de padrão de 5-HMF (5-hidroximetilfurfural) que foram diluídas em água - relação massa/massa (m/m) - e após filtração foram analisadas pelo Cromatógrafo Shimadzu LC-2030C LT Plus acoplado com coluna CarboSep Coregel 87MM, 200mm (CETEC, 2023).

2.2.7. Cálculo para TBH e TCH

A produtividade em tonelada de colmo por hectare (TCH), foi calculada a partir de:
 Peso de 10 colmos (kg) / 10 * n° de colmos por metro * (10 / espaçamento entre linhas)

A Tonelada de Brix por hectare (TBH), foi obtido a partir do cálculo:

$((TCH * \text{Brix médio}) / 100)$.

2.3. Preparação das folhas A+1 para análise metabolômica

Seguindo o fluxograma da Figura 3, foram colhidas 30 folhas A+1 em cada um dos períodos mencionados (3 meses, 6 meses e antes da colheita). Essa numeração da folha é parte de um sistema desenvolvido por Kuijper (Marafon, 2012), que é utilizado para entender o crescimento e da nutrição da planta. O conhecimento dessa numeração é importante para realizar análises morfológicas e fisiológicas da planta, ajudando a entender o desenvolvimento e assimilação de nutrientes da cana-de-açúcar. As folhas foram lavadas, higienizadas com sabão neutro, enxaguadas com água destilada, colocadas para secar durante 48 horas em local seco e arejado sem incidência de luz. Decorrido esse tempo, as folhas foram trituradas em moinho de facas e encaminhadas para as análises de nutrientes.

2.3.1. Análise de nitrogênio (digestão sulfúrica) das folhas com 3 meses (N3), com 6 meses (N6) e antes da colheita (NFAC)

Para medir a quantidade de nitrogênio foram pesadas 0,1 g das folhas que foi colocada em macrotubo para digestão, acrescentou-se 200 mg da mistura digestora (pesou 485 g de sulfato de sódio anidro, 36 g de selenito de sódio, 40 g de sulfato de cobre pentaidratado) e

3 mL de ácido sulfúrico 95 a 98%. Colocou o macrotubo com o material no bloco digestor, em capela de exaustão, até atingir 350°C para a digestão por um período de aproximadamente 1 hora ou até que a amostra atingisse coloração clara. Após a digestão deixou a amostra esfriar e adicionou 3 mL de água destilada. Após a digestão a amostra foi levada ao destilador de nitrogênio. Iniciou o processo de destilação, abrindo o registro de água do destilador antes de ligar, verificou o volume de água na caldeira. Em seguida colocou o macrotubo com a amostra no suporte, abriu a válvula do copo dosador contendo hidróxido de sódio a 40%, após esse processo fechou o copo dosador. Colocou Erlenmeyer de 250 mL contendo 10 mL de solução indicadora de vermelho de metila com verde de bromocresol e ácido bórico a 2% no suporte de coleta e ligou o destilador deixando o material destilar até atingir o volume de 50 mL no Erlenmeyer. Após a destilação a amostra foi titulada com HCl 0,05 N mudando da cor verde para rosa. O volume de HCl gasto corresponde a 0,05 em g de N ou $0,05 \times 14$ mg de N = 0,7 mg de N. Ou seja, para 100 mg de amostra foram gastos, por exemplo, 5 mL de ácido a 0,05 N, então, em 100 mg de amostra tem-se 3,5 mg de N. Ou ainda: 7 Volume em mL de ácido gasto na titulação = concentração de N na amostra, dada em g de N / kg de MS.

2.3.2. Análise Metabolômica por Ressonância Magnética Nuclear de Hidrogênio (RMN de ^1H)

Aos 3 e 12 meses após o plantio foram coletadas 50 folhas A+1 de cada tratamento, pois sendo ela indicativo de saúde e vigor, boa parte dos compostos metabólicos são encontrados nelas, além de informações como os teores de clorofila das plantas. As folhas foram lavadas com detergente neutro, enxaguadas com água destilada por três enxagues e levadas para serem secas em estufa de ventilação forçada a 40 °C por 48 horas (Dutra *et al.*, 2023). Em seguida, amostra representativa de cada tratamento foi preparada pela combinação de todas as folhas coletadas do respectivo tratamento. As folhas secas foram moídas em moinho e, após a moagem, as amostras foram armazenadas em freezer até a realização da análise por Ressonância Magnética Nuclear de Hidrogênio (RMN de ^1H).

A metodologia descrita por Kim *et al.* (2010) foi adotada para a obtenção dos extratos. Para tanto, 50 mg de folhas foram submetidos à extração com uma mistura de 0,75 ml de solução tampão de KH_2PO_4 em D_2O (90 mM e pH 6,0), contendo TSP-d4 (3-(trimetilsilil)-[2,2,3,3- $^2\text{H}_4$]-1-propiónico de sódio) a 0,01% (m/v), e 0,75 ml de metanol-d4. Após a

combinação dos solventes, as amostras foram agitadas em vortex por 1 min, seguidas de sonicação em banho ultrassônico por 20 min e centrifugação por 10 min a 17.000 g. Em seguida, 800 μ L do sobrenadante foi transferido para tubos de RMN de 5 mm de diâmetro.

Os experimentos foram conduzidos em espectrômetro de RMN (Avance Neo 600 MHz, Bruker, Fällanden, Suíça). Os espectros de RMN de ^1H foram adquiridos a 300 K, com largura espectral de 12 ppm e 64k pontos de dados, utilizando pré-saturação do sinal de HDO, 128 varreduras (scans), tempo de aquisição (AQ) e atraso de relaxamento (d1) de 2,6 s e 5 s, respectivamente. Todos os espectros foram obtidos por meio da sequência de pulsos zgpg30 e calibrados com o sinal do TSP-d4 em 0,00 ppm. A correção automática das fases e das linhas de base foi realizada utilizando o software Chenomx NMR Suite 10.0 (Chenomx Inc., Edmonton, Canadá). Nesse mesmo programa, os compostos foram identificados por meio da comparação dos espectros obtidos com aqueles das substâncias puras presentes no banco de dados. Para confirmar as atribuições espectrais, foram realizados experimentos bidimensionais, como HSQC e COSY (dados não apresentados). A identificação dos compostos também pôde ser corroborada com dados de RMN de estudos com cana-de-açúcar (citação).

2.3.3 Análise Quimiométrica

Os espectros de RMN de ^1H dos extratos foliares foram convertidos em matriz de área versus intervalos de δ 0,04 (bin), processo conhecido como binning. Essa conversão foi realizada no software Chenomx NMR Suite 10.0 (Chenomx Inc., Edmonton, Canadá). Antes das análises, as regiões δ 4,68–4,88 e δ 3,26–3,36 foram removidas para eliminar variações associadas à supressão dos sinais de HOD e metanol, respectivamente. Em seguida, os dados foram normalizados pela soma e escalonados por Pareto (Emwas *et al.*, 2018).

A análise de variância (One-way ANOVA), seguida do teste post hoc de Tukey HSD ($p < 0,05$), foi conduzida na plataforma online MetaboAnalyst 6.0 (Xia; Wishart., 2011). Essa mesma plataforma também foi utilizada para a análise de componentes principais (PCA) e Análise Ortogonal Discriminante por Mínimos Quadrados Parciais (OPLS-DA), validada por meio de teste de permutação (1000 vezes).

2.4. Análise Estatística

Com o objetivo de reduzir a dimensionalidade dos dados e selecionar variáveis representativas para análises subsequentes, foi realizada análise de correlação de Pearson entre as variáveis de qualidade biométricas e de qualidade tecnológicas da cana. Essa abordagem permitiu identificar redundâncias e compreender as interações entre os atributos avaliados. A análise visou também facilitar a escolha das variáveis mais relevantes a serem incluídas nas análises de variância e na análise de componentes principais (PCA).

As análises de correlação foram conduzidas no ambiente estatístico R (versão 4.4.2; R Core Team, 2024), utilizando a função `ggpairs` do pacote `GGally` (Schloerke *et al.*, 2021), o qual permite a visualização simultânea de correlações, distribuições e relações bivariadas em pares de variáveis.

Após a seleção das variáveis foi realizada Análise de Componentes Principais (PCA) com o objetivo de reduzir a dimensionalidade dos dados, identificar padrões de agrupamento e compreender a variabilidade entre os tratamentos avaliados. A análise foi realizada utilizando o pacote `FactoMineR` (Lê *et al.*, 2008), que permite a condução de PCA com variáveis contínuas padronizadas. A visualização dos resultados foi feita por meio de gráficos biplot, gerados com o auxílio do pacote `factoextra` (Kassambara & Mundt, 2020).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de correlação de Pearson mostrou que algumas variáveis apresentaram maior interação, evidenciando relações diretas entre as medidas biométricas, produtivas e tecnológicas da cana-de-açúcar CTC 9002. Valores de correlação próximos de 1,0 (representados pelas marcações em azul) indicam interações estatisticamente mais robustas entre as variáveis, enquanto valores negativos (marcações em vermelho) sugerem relações inversas ou antagonistas, conforme representado na Figura 4.

O grupo irrigado com vinhaça apresentou associação com variáveis relacionadas à produtividade, como tonelada de colmo por hectare (TCH), peso de colmos (P10C e PCD), comprimento de colmo (CMC), comprimento do palmito (CP), número de nós (NN), número de entrenós (NE), massa foliar (MFA), número de perfilhos (P10), além de parâmetros de qualidade como sacarose no Brix (SX), glicose (G), frutose (Fru), e nitrogênio foliar em diferentes estágios (N6 e NFAC). Essas associações indicam que a irrigação com vinhaça

favoreceu o crescimento vegetativo, a acumulação de biomassa e a síntese de açúcares, refletindo-se em um desempenho superior da cultura. A fertirrigação localizada com vinhaça proporcionou benefícios para o crescimento e produtividade da cana-de-açúcar CTC 9002, favorecendo não apenas os parâmetros biométricos, mas também mantendo a qualidade tecnológica do caldo (Arcoverde *et al.*, 2019; Oliva; Jacometti, 2023).

Esses resultados reforçam a vinhaça como biofertilizante que potencializa o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar por meio do fornecimento de potássio, nutrientes e matéria orgânica ao solo. Esse efeito foi amplamente discutido por Silva *et al.* (2012) e Cipriano *et al.*, (2019) que destacam o efeito positivo da fertirrigação na expansão celular dos colmos e no perfilhamento das plantas.

Observou-se também correlação positiva entre o comprimento do colmo (CMC) e o número de entrenós (NE) ($r = 0,85$), indicando que este parâmetro está diretamente associado ao aumento do número de segmentos nodais, e maior produtividade da cultura. Resultado esperado em sistemas de produção com adequada disponibilidade hídrica e nutricional (Silva *et al.*, 2012; Chinelato, 2016).

A massa fresca das folhas (MFA) apresentou alta correlação com o peso dos colmos (P10C) ($r = 0,84$), sugerindo que a maior área foliar proporcionada pela fertirrigação favoreceu a interceptação de radiação solar e, conseqüentemente maior atividade fotossintética que culminou com maior acúmulo de biomassa, esses resultados estão em consonância com as observações de Barbosa (2024) e Arcoverde *et al.* (2020).

Por outro lado, o índice de maturação (IM) apresentou correlação negativa com o comprimento do colmo (CMC) ($r = -0,77$), o que indica que plantas com maior crescimento vegetativo podem apresentar atraso na concentração de açúcares no colmo (Costa *et al.*, 2021; Nascimento, 2023; Oliva; Jacometti, 2023).

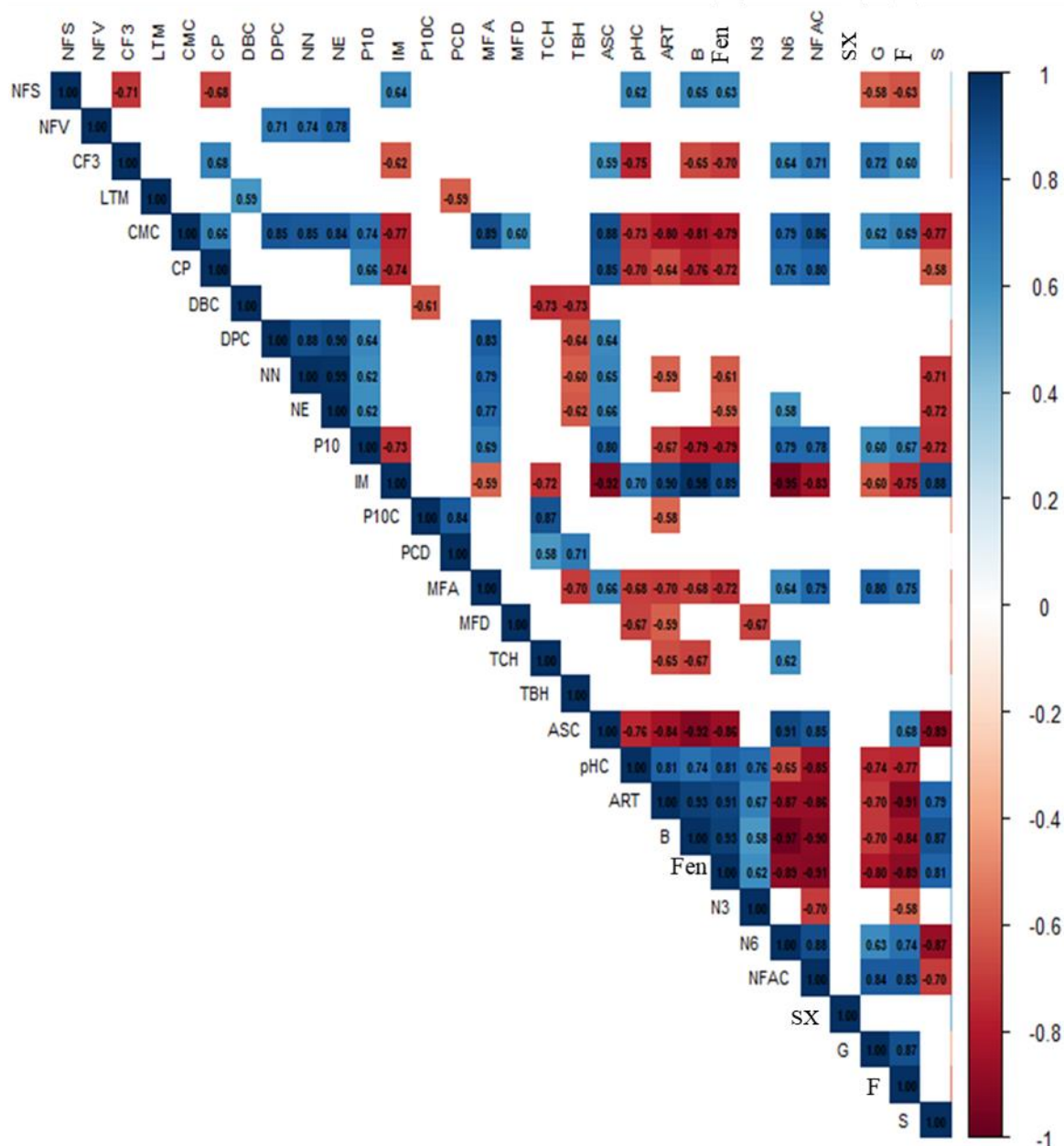


Figura 4 – Correlação de Pearson entre as variáveis de qualidade biométricas e tecnológicas da cana-de-açúcar, onde as seguintes siglas correspondem a: ART: açúcar redutor total; ASC: acidez sulfúrica; B: Brix; CF3: comprimento folha +3; CMC: comprimento do colmo; CP: comprimento do palmito; DBC: diâmetro da base do colmo; DPC: diâmetro da ponta do colmo; F: frutose; Fen: fenol; G: glicose; IM: índice de maturação; LTM: largura do terço médio; MFA: massa foliar antes; MFD: massa foliar depois; N3: nitrogênio foliar 3 meses; N6: nitrogênio foliar 6 meses; NE: número de entrenós; NFAC: nitrogênio foliar antes da colheita; NFS: número de folhas secas; NFV: número de folhas verdes; NN: número de nós; P10: perfilho em 10 touceiras; P10C: peso de 10 colmos antes; PCD: peso de 10 colmos

depois; pH: pH caldo; S: sacarose; SX: sacarose no Brix; TBH: tonelada de Brix por hectare; TCH: tonelada de colmo por hectare.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

A irrigação com vinhaça promoveu alterações significativas no desempenho agrônômico da cana-de-açúcar, conforme evidenciado pela Análise de Componentes Principais (PCA) (Figura 5). Observou-se também a correlação negativa dos compostos fenólicos (Fen) com os teores de sacarose (S) ($r = -0,70$), glicose (G) ($r = -0,68$) e frutose (F) ($r = -0,72$), reforçando que ambientes mais restritivos ao desenvolvimento vegetal, como na área controle (P2), favorecem a síntese de metabólitos secundários associados a estresses ambientais ou nutricionais (Dutra *et al.*, 2023).

A acidez sulfúrica ou acidez total (ASC) do caldo permite avaliar a qualidade tecnológica da cana. Oliveira Filho *et al.* (2016) observou a relação inversa da acidez total, com os açúcares redutores totais (ART) ($r = -0,84$), indicando que o aumento do teor de açúcares resulta em redução da acidez do caldo, que é indicativo positivo para a qualidade tecnológica da matéria-prima.

A irrigação com vinhaça promoveu alterações significativas no desenvolvimento da cana-de-açúcar, conforme observado pela Análise de Componentes Principais (PCA) (Figura 5). Os dois primeiros componentes principais (Dim1 e Dim2) explicaram conjuntamente 69,6% da variância total dos dados. O agrupamento das amostras revelou separação entre as áreas irrigadas com vinhaça (P1) e as áreas sem irrigação (P2), evidenciando a influência do manejo da vinhaça sobre as características biométricas, fisiológicas e tecnológicas da cultura.

O tratamento irrigado com vinhaça apresentou maior associação com variáveis relacionadas à produtividade e ao desenvolvimento vegetativo, tais como: tonelada de colmo por hectare (TCH), peso de 10 colmos (P10C), peso do colmo desidratado (PCD), comprimento do colmo (CMC), comprimento do palmito (CP), número de nós (NN), número de entrenós (NE), massa fresca de folhas (MFA), número de perfilhos (P10), além de parâmetros tecnológicos como sacarose no Brix (SX), glicose (G), frutose (Fru) e nitrogênio foliar em diferentes estádios (N6 e NFAC) (Dias; Silva, 2020).

A aplicação de vinhaça na forma de fertirrigação permite a reciclagem dos nutrientes absorvidos pela cultura durante o ciclo produtivo, uma vez que estes permanecem disponíveis no resíduo do processo industrial. Além de elevar os teores de nutrientes e a umidade do solo,

esse manejo contribui diretamente para o desenvolvimento da cultura, reduzindo a necessidade de adubação mineral e, consequentemente, os custos de produção. A vinhaça na forma de fertirrigação visa reciclar os nutrientes extraídos pela cultura da cana durante o seu desenvolvimento e que estão disponíveis no resíduo. A aplicação de vinhaça faz com que os teores de nutrientes no solo e a umidade se elevem, favorecendo o desenvolvimento da cultura (Silva *et al.*, 2021).

Em contraste, o grupo sem fertirrigação (P2) apresentou associação com variáveis relacionadas principalmente ao estado de maturação da planta e a possíveis condições de estresse, como número de folhas secas (NFS), índice de maturação (IM), Brix (B), açúcares redutores totais (ART), compostos fenólicos (Fen) e sacarose (S). A análise tecnológica do caldo e seu predomínio no grupo sem irrigação sugere que essas plantas, com menor disponibilidade hídrica e nutricional, anteciparam o processo de maturação, em detrimento do crescimento vegetativo e da produtividade final (Oliveira *et al.*, 2016; Costa *et al.*, 2019) observados na Figura 5.

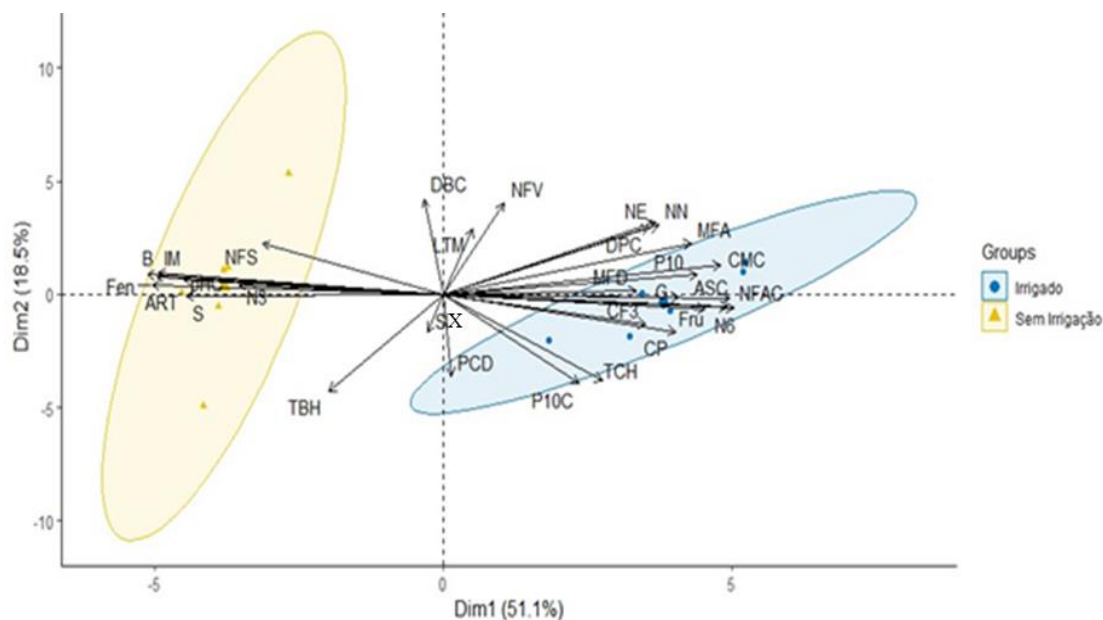


Figura 5 – Análise de componentes principais (PCA) entre as variáveis de qualidade biométricas e de qualidade tecnológicas da cana-de-açúcar, comparando o manejo irrigado com vinhaça com o sem irrigação, onde as seguintes siglas correspondem a: ART: açúcar redutor total; ASC: acidez sulfúrica; B: Brix; CF3: comprimento folha +3; CMC: comprimento do colmo; CP: comprimento do palmito; DBC: diâmetro da base do colmo; DPC: diâmetro da ponta do colmo; F: frutose; Fen: fenol; G: glicose; IM: índice de maturação;

LTM: largura do terço médio; MFA: massa foliar antes; MFD: massa foliar depois; N3: nitrogênio foliar 3 meses; N6: nitrogênio foliar 6 meses; NE: número de entrenós; NFAC: nitrogênio foliar antes da colheita; NFS: número de folhas secas; NFV: número de folhas verdes; NN: número de nós; P10: perfilho em 10 touceiras; P10C: peso de 10 colmos antes; PCD: peso de 10 colmos depois; pH: pH caldo; S: sacarose; SX: sacarose no Brix; TBH: tonelada de Brix por hectare; TCH: tonelada de colmo por hectare.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Os resultados obtidos confirmam que o tratamento fertirrigado com vinhaça proporcionou desempenho agrônomico superior, refletido na melhor performance das variáveis TCH, Fru, ASC, G e N6 e NFAC. Esse efeito positivo do nitrogênio foliar pode ter favorecido o maior desenvolvimento do sistema radicular, influenciando na capacidade de absorção de água e nutrientes, resultando em plantas mais vigorosas (Campos *et al.*, 2015; Jha *et al.*, 2019; Arcoverde *et al.*, 2020). Os parâmetros da biometria: NN, NE, MFA, MFD, CMC e TCH indicaram resposta positiva ao tratamento, evidenciada por plantas mais altas e com maior densidade de colmos em comparação com os grupos que não receberam vinhaça. Esses resultados reforçam o papel da vinhaça não apenas na nutrição da cana-de-açúcar, mas também no desenvolvimento de características morfofisiológicas essenciais ao bom desempenho da cultura. (Silva *et al.*, 2021).

O comprimento da folha +3 (CF3) interagiu com seis variáveis: o CP, ASC, N6, NFAC, G e Fen. A folha +3 é importante marcador do estado fisiológico da planta, representando o equilíbrio entre crescimento vegetativo e qualidade tecnológica. O maior desenvolvimento dessa folha no tratamento irrigado com vinhaça evidência maior eficiência no uso dos fotoassimilados, refletindo em colmos mais longos (CMC), com maior diâmetro (DBC) e com maior número de perfilhos (P10) (Oliveira *et al.*, 2016).

O CMC foi a variável com maior número de correlações significativas, totalizando 12, sendo um dos principais indicadores do desenvolvimento das plantas. Considerando que o colmo é a estrutura de maior importância econômica da cana, e seu crescimento está diretamente relacionado com o acúmulo de sacarose, este resultado reforça a influência positiva da irrigação com vinhaça sobre o desempenho da cultura (Chinelato, 2016).

Também foi observada correlação entre CMC e compostos fenólicos (Fen) e glicose (G), principalmente nas plantas do grupo sem irrigação. A literatura descreve que o acúmulo de compostos fenólicos é um mecanismo de defesa das plantas frente a estresses ambientais,

como pragas, sendo a glicose um substrato fundamental na biossíntese desses compostos (Costa *et al.*, 2021).

3.1. Análise de RMN de ^1H

A aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar tem sido historicamente reconhecida por seu potencial como fertilizante orgânico, fornecendo nutrientes à planta e melhorando atributos do solo. Entretanto, seus efeitos no metabolismo foliar da planta ainda carecem de investigação aprofundada. A análise dos espectros de RMN de ^1H revelou diferenças na composição metabólica dos extratos de folhas de cana-de-açúcar entre os tratamentos ao longo do tempo (Figura 6). Aos 3 meses, as amostras controle (C) apresentaram maior intensidade relativa na região de aminoácidos e ácidos orgânicos (δ 0,50 a 3,00), enquanto as amostras tratadas com vinhaça (V) exibiram sinais mais intensos na região de carboidratos (δ 3,00 a 5,00), sugerindo maior acúmulo de açúcares solúveis, notadamente sacarose. Esse aumento sugere uma estimulação do metabolismo fotossintético ou uma redução na exportação de açúcares, possivelmente como resposta a um estresse inicial imposto pela vinhaça, como salinidade ou acidez (Carpanez *et al.*, 2022). Além disso, os sinais de compostos aromáticos (δ 6,00 a 9,00) apresentaram redução de intensidade nas amostras tratadas com vinhaça, sugerindo uma possível modulação na biossíntese desses metabólitos com possível supressão de vias relacionadas a compostos fenólicos, que têm papel na defesa da planta (Manickam, *et al.*, 2023).

Aos 12 meses, os perfis metabólicos entre os tratamentos tornaram-se mais similares, indicando que os efeitos da vinhaça foram mais evidentes na fase inicial do crescimento, mas que as plantas ajustaram seu metabolismo ao longo do tempo. As variações mais evidentes ocorreram na região onde estão localizados sinais característicos de açúcares e aminoácidos, metabólitos relacionados ao metabolismo energético e à resposta da planta a diferentes condições ambientais. Os carboidratos desempenham papel importante no ajuste osmótico das plantas, sendo apontados como os principais responsáveis por esse mecanismo adaptativo frente a condições adversas (Babita *et al.*, 2010).

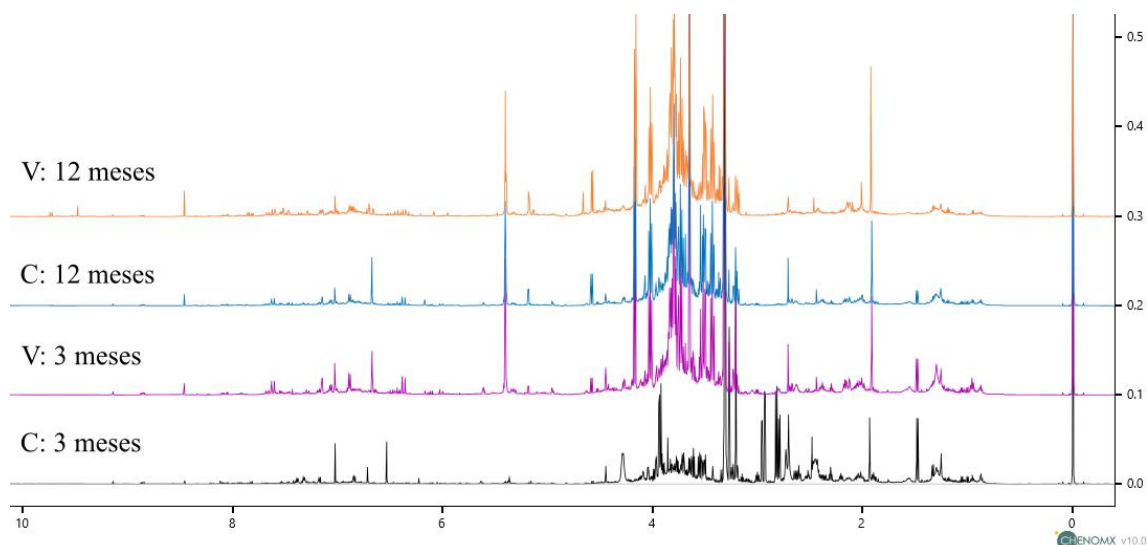


Figura 6 - Espectros de RMN de ^1H (tampão KH_2PO_4 em D_2O /metanol- d_4 1:1, 600 MHz) dos extratos de folhas de cana-de-açúcar cultivadas em solo sem vinhaça (C, controle), com adubação empregando a vinhaça (V, vinhaça).

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Para uma avaliação quantitativa dessas diferenças, realizou-se o teste ANOVA one-way com teste post hoc de Tukey HSD ($p < 0,05$). Dos 243 bins analisados, 204 apresentaram diferenças significativas, enquanto 39 não foram significativos (Figura 7). Com base nesses resultados, os bins significativos foram selecionados para compor a matriz de dados utilizada na análise de componentes principais (PCA).

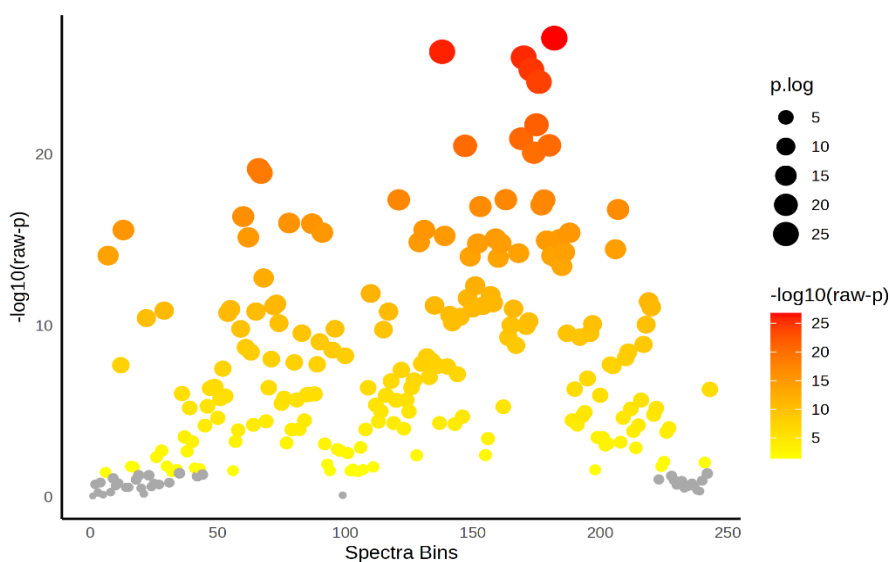


Figura 7 - Gráfico dos valores de $-\log(p\text{-valor})$ obtidos a partir da ANOVA one-way. Os bins não significativos são apresentados em cinza ($n = 39$).

Fonte: Elaboração própria, 2025.

A PCA revelou uma separação clara entre os tratamentos e tempos avaliados (Figura 8). O primeiro componente principal (PC1), responsável por 80,6% da variância total, diferencia principalmente as amostras controle aos 3 meses (C: 3 meses) das tratadas com vinhaça (V: 3 meses e V: 12 meses) e do controle aos 12 meses (C: 12 meses), destacando o efeito do tratamento na composição metabólica. O segundo componente principal (PC2), que explica 10,1% da variância, reflete variações associadas à adaptação metabólica ao longo do tempo e também ao efeito do tratamento, uma vez que separa as amostras controle e tratadas com vinhaça aos 12 meses.

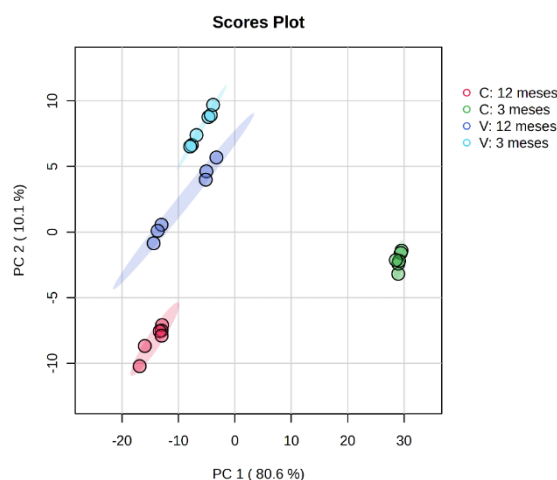


Figura 8 - Gráfico de escores da componente 1 (PC1) versus componente 2 (PC2) da Análise de Componentes Principais (PCA), obtido a partir dos espectros de RMN de ^1H dos extratos de folhas de cana-de-açúcar sem adição de vinhaça (C) e com adição de vinhaça (V) aos 3 e 12 meses após o plantio.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

De forma geral, as amostras do controle aos 3 meses (C: 3 meses) apresentaram um perfil metabólico distinto dos demais. Já as amostras tratadas com vinhaça aos 3 e 12 meses (V: 3 meses e V: 12 meses) se agruparam, sugerindo que perfil metabólico são semelhantes ao longo do tempo. No entanto, observa-se que, embora as amostras do controle e tratadas com vinhaça aos 12 meses (C: 12 meses e V: 12 meses) estejam mais próximas do que em 3 meses, ainda há diferenças metabólicas entre elas. Isso indica que, apesar de um ajuste metabólico progressivo, os efeitos da vinhaça no metabolismo foliar persistem ao longo do período avaliado.

Para entender melhor quais metabólitos estavam associados à separação observada, foi realizada a análise do PCA biplot, identificando os 25 bins que mais influenciaram a distinção entre os tratamentos (Figura 9). Os resultados mostraram que os sinais da sacarose (δ 3,52–5,44) contribuíram para a separação dos tratamentos no PC1 negativo, enquanto os sinais do ácido acético (δ 1,92), ácido málico (δ 4,32), ácido cítrico (δ 2,56–2,72) e asparagina (δ 2,80–2,96) foram determinantes para a separação no PC1 positivo. Com essa análise, foi possível caracterizar os principais metabólitos responsáveis pela distinção do grupo C: 3 meses em relação aos demais tratamentos. Esse grupo apresentou concentrações relativamente mais elevadas dos ácidos orgânicos identificados e menor concentração de sacarose em comparação aos outros tratamentos. Por outro lado, não foi possível identificar metabólitos que diferenciassem claramente V: 12 meses de C: 12 meses, o que motivou a realização da análise OPLS-DA para explorar essa distinção de forma mais detalhada.

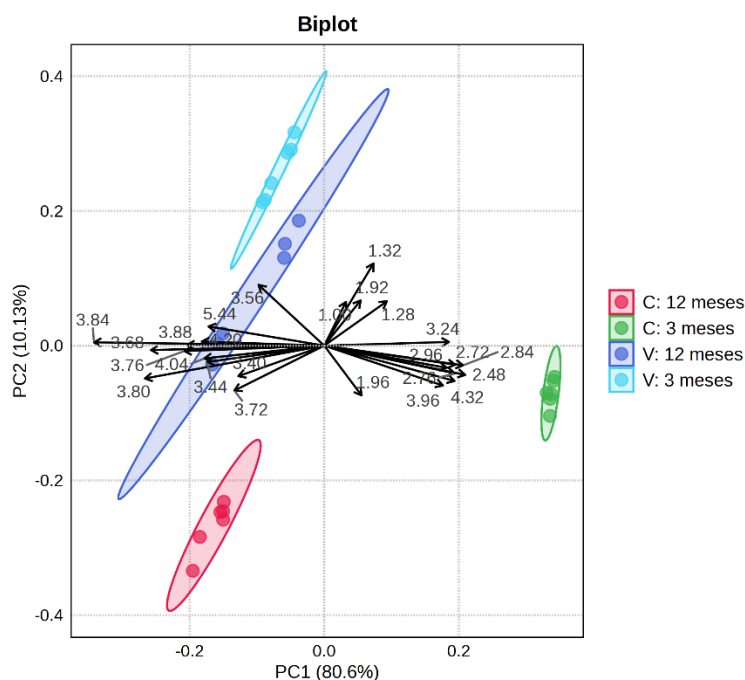


Figura 9 - PCA biplot obtido a partir dos espectros de RMN de ¹H dos extratos de folhas de cana-de-açúcar sem adição de vinhaça (C) e com adição de vinhaça (V) aos 3 e 12 meses após o plantio.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

O modelo OPLS-DA revelou diferenças entre os extratos das folhas de cana-de-açúcar após 12 meses do plantio (Figura 10). Além disso, observou-se uma boa capacidade preditiva, com $Q^2 = 0,97$ ($p = 0,003$), e um excelente ajuste, com $R^2Y = 0,99$ ($p = 0,003$).

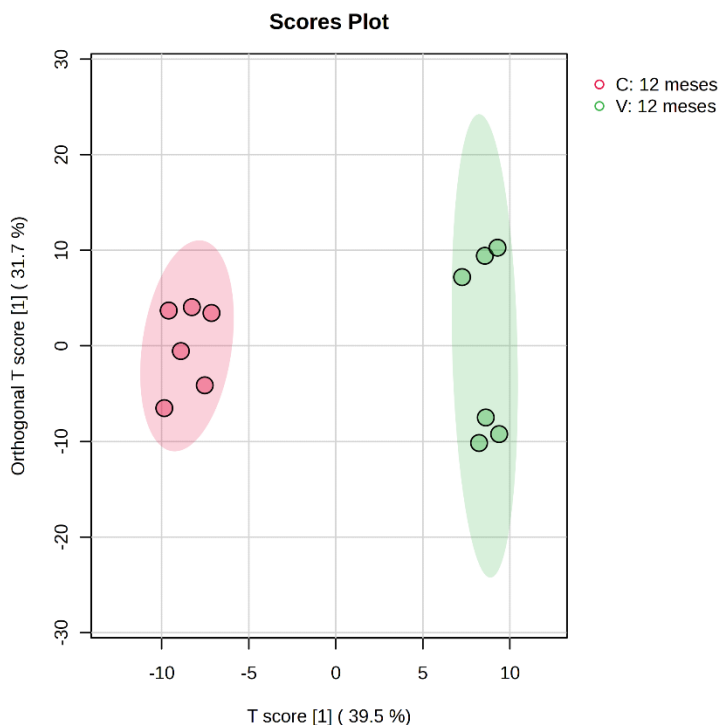


Figura 10 - Gráficos de scores da análise estatística supervisionada OPLS-DA obtido a partir dos espectros de RMN de ^1H dos extratos de folhas de cana-de-açúcar sem adição de vinhaça (C) e com adição de vinhaça (V) aos 12 meses após o plantio.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

Os bins que contribuíram significativamente para a separação entre os tratamentos foram selecionados com base em um VIP score $> 1,50$, sendo eles: 9,76; 7,56; 9,52; 2,72; 8,48; 4,68; 4,16; 7,88; 9,56; 7,84; 3,92; 6,20; 3,56; 1,92; 4,32; 4,48; 4,12; 6,72 (Figura 11). Dentre esses, os bins 2,72; 6,20; 3,56; 1,92 e 6,72 apresentaram maior concentração relativa no grupo V: 12 meses. Os demais, conforme indicado na Figura 11, mostraram maiores concentrações no tratamento controle (C).

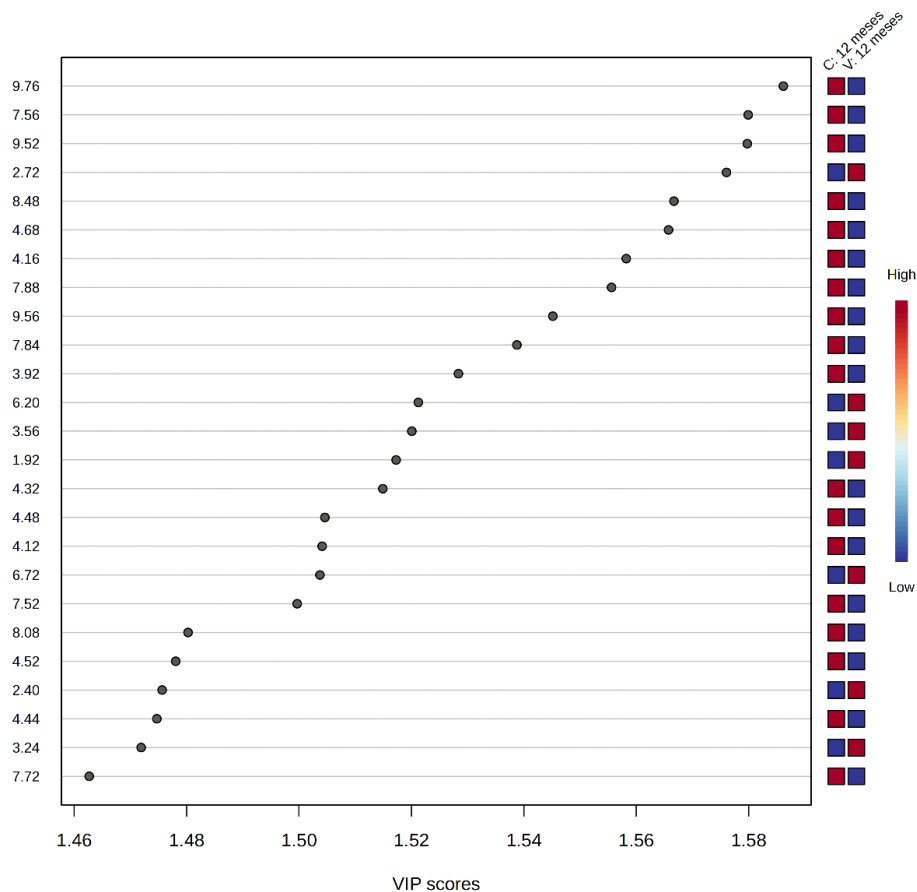


Figura 11- Gráficos de vip scores da análise estatística supervisionada OPLS-DA obtido a partir dos espectros de RMN de ^1H dos extratos de folhas de cana-de-açúcar sem adição de vinhaça (C) e com adição de vinhaça (V) aos 12 meses após o plantio.

Fonte: Elaboração própria, 2025.

A partir da análise dos bins no tratamento com vinhaça V: 12 meses, foi possível identificar dois isômeros do ácido aconítico: o ácido trans-aconítico (δ 6,72) e o ácido cis-aconítico (δ 6,20). Esses compostos apresentam maior concentração relativa no grupo V: 12 meses, indicando que o tratamento com vinhaça pode ter influenciado o acúmulo desses ácidos nas folhas de cana-de-açúcar. A presença desses isômeros sugere alterações nas vias metabólicas das plantas sob esse tratamento, possivelmente relacionadas ao metabolismo energético e ao ciclo do ácido cítrico.

Observou-se adaptação metabólica da cana-de-açúcar aos 12 meses, as diferenças entre os tratamentos tornam-se menos pronunciadas. Isso indica que a planta ajusta progressivamente seu metabolismo foliar frente à aplicação contínua de vinhaça. Contudo, a

análise OPLS-DA revela que a distinção entre tratamentos persiste, com acúmulo significativo de ácidos orgânicos, como ácido acético, málico, cítrico e os isômeros do ácido aconítico nas amostras tratadas. Tais compostos são intermediários do ciclo do ácido tricarboxílico (TCA), o que pode indicar alterações na respiração mitocondrial ou acúmulo de substratos associados ao metabolismo de estresse (Ferne; Stitt, 2012). A presença aumentada de ácido cis- e trans-aconítico nas folhas tratadas com vinhaça é particularmente relevante. Esses metabólitos são pouco abundantes em tecidos foliares em condições normais e podem servir como biomarcadores de desequilíbrio no ciclo TCA ou de ativação de vias relacionadas ao metabolismo secundário induzido por estresses abióticos. Estudos recentes têm utilizado abordagens metabolômicas para identificar tais marcadores em plantas submetidas a condições de salinidade, deficiências nutricionais ou interações com microrganismos (Weckwerth *et al.*, 2004; Dias *et al.*, 2022).

4. CONCLUSÃO

A partir da análise dos dados apresentados, concluiu-se que a fertirrigação com vinhaça exerce um impacto significativo no metabolismo da cana-de-açúcar, principalmente nas fases iniciais do crescimento. As análises de PCA e OPLS-DA destacaram que, embora as plantas ajustem progressivamente seu metabolismo foliar ao longo do tempo, diferenças metabólicas entre os tratamentos controle e com vinhaça ainda persistem após 12 meses.

A fertirrigação com vinhaça apresentou significância positiva nos parâmetros biométricos e produtivos da cana-de-açúcar, revelando como uma prática viável aos produtores. A associação direta com variáveis como tonelada de colmo por hectare (TCH), demonstra que a vinhaça favorece o crescimento vegetativo, a acumulação de biomassa e a síntese de açúcares, refletindo em um desempenho satisfatório da cultura durante seu crescimento e colheita.

A PCA revelou interações entre os tratamentos, mostrando que a fertirrigação influencia diretamente os atributos de crescimento das plantas. Por outro lado, o contraste com os grupos sem irrigação reforça a eficiência do uso da vinhaça na diminuição de condições de estresse hídrico, promovendo maior perseverança da cultura em estações secas.

A relação de variáveis como os compostos fenólicos e glicose aponta a necessidade de monitoramento constante para evitar efeitos indesejáveis de estresse ambiental, como altas

temperaturas e falta de irrigação proporcionada a mais pela vinhaça, que foi submetido o tratamento controle.

A fertirrigação com vinhaça destaca-se como uma solução viável para o setor sucroenergético, equilibrando ganhos produtivos com a valorização de subprodutos oriundos da indústria e a preservação de recursos naturais, reafirmando sua importância para o avanço da agricultura moderna.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCOVERDE, S. N. S.; DE SOUZA, C. M. A.; ORLANDO, R. C.; DA SILVA, M. M.; DO NASCIMENTO, J. M. Crescimento inicial de cultivares de cana-de-açúcar em plantio de inverno sob preparos conservacionistas do solo. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 27, n. 2, p. 142-156, 2019. DOI: <https://doi.org/10.13083/reveng.v27i2.803>. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/reveng/article/view/803>. Acesso em: 20 fev 2025.

ARCOVERDE, S. N. S.; DE SOUZA, C. M. A.; NAGAHAMA, H. DE J.; SANTOS, W. R. Biometria de diferentes variedades de cana cultivada em sistema plantio direto e preparo reduzido. **Energia na Agricultura**, v. 35, n. 2, p. 199-213, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.17224/EnergAgric.2020v35n2p199-213>. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/3115>. Acesso em: 26 fev 2025.

BABITA M.; MAHESWARI, M.; RAO, L.M.; SHANKERB, A.K.; RAO, G.D. Osmotic adjustment, drought tolerance and yield in castor (*Ricinus communis* L.) hybrids. **Environmental and Experimental Botany**, v. 69, n. 3, p. 243–249, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.05.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0098847210001176>. Acesso em: 15 fev 2025.

BARBOSA, A. DE M. Avaliações biométricas na cultura da cana-de-açúcar. **Boletim de Pesquisa do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Unoeste**. v. 6, p. 74-78, 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/385411722_Avaliacoes_biometricas_na_cultura_da_cana-de-acucar. Acesso em: 29 jan 2025.

BIOTROP, Biological Technology Solutions. **Artigo: Utilização da vinhaça com aplicação localizada nas linhas da cultura da cana-de-açúcar**. Vinhedo, 2022. Disponível em: <https://biotrop.com.br/utilizacao-da-vinhaca-com-aplicacao-localizada-nas-linhas-da-cultura-da-cana-de-acucar/>. Acesso em: 12 jan 2024.

CAMPOS, F. DA S.; ALVES, M. C.; DE SOUZA, Z. M.; TORRES, J. L. R. Cropping systems evaluation, fertilization, and effects on technological quality and sugarcane productivity. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 34, p. 3387-3393, 2015. DOI: 10.5897/AJAR2015.9977. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/281712188_Cropping_systems_evaluation_fertilization_and_effects_on_technological_quality_and_sugarcane_productivity. Acesso em: 23 mar 2025.

CHINELATO, P. H. **Produtividade e comportamento biométrico da cana-de-açúcar sob aplicação de vinhaça (*in natura*) e adubação mineral via gotejamento subsuperficial. Piracicaba, SP.** Orientador: Jarbas Honório de Miranda. 2016. 115p. Dissertação (Mestrado em Ciências, área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas). Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, São Paulo – SP. 2016. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11152/tde-10082016-144600/pt-br.php>. Acesso em: 05 jan 2025.

CETEC, Equipamentos para Laboratorio Ltda, CETEC, 2023 **Determinação da concentração de carboidratos e etanol por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência – HPLC.** 3ª revisão, Ribeirão Preto.

CIPRIANO, M. A. P.; SULEIMAN, A. K. A.; DA SILVEIRA, A. P. D.; DO CARMO, J. B.; KURAMAE, E. E. Bacterial community composition and diversity of two different forms of an organic residue of bioenergy crop. **PeerJ**, v. 7, n. 6768, 2019. DOI 10.7717/peerj.6768. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31024771/>. Acesso em: 03 mar 2025.

CONAB - **COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. CONAB - Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar.** Brasília. 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5501-brasil-deve-atingir-recorde-na-producao-de-acucar-mesmo-com-reducao-na-producao-de-cana-de-acucar-na-safra-2024-2025>. Acesso em: 03 mar. 2025.

COSTA, A. R. F. C.; ROLIM, M. M.; SIMÕES NETO, D. E.; DA SILVA, M. M.; DA SILVA, G. F.; PEDROSA, E. M. R. Produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar submetida a diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio. **Irriga**, v. 24, n. 1, p. 38-53, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2019v24n1p38-53>. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/2818>. Acesso em: 01 fev 2025.

COSTA, M. S.; ROLIM, M. M.; SILVA, G. F. DA; SIMÕES NETO, D. E.; PEDROSA, E. M. R. Nutrient content and accumulation in sugarcane under mineral fertilization and high doses of vinasse. Semina: **Ciências Agrárias**, v. 42, n. 2, p. 565-582, 2021. DOI: <https://10.5433/1679-0359.2021v42n2p565>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/350665620_Nutrient_content_and_accumulation_in_sugarcane_under_mineral_fertilization_and_high_doses_of_vinasse. Acesso em: 10 jul 2023.

CTC, Centro de Tecnologia Canavieira. **Manual de métodos de análises para açúcar.** 2005, Piracicaba, Laboratório de análises. CD ROM.

DIAS, J. P. T.; SILVA, M. A. Effect in greenhouse of commercial biostimulant on

sugarcane seedlings growth. **Biotecnología Vegetal**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 23-31, 2020. Disponível em: <http://scielo.sld.cu/pdf/bvg/v20n1/2074-8647-bvg-20-01-23.pdf>. Acesso em: 12 mai 2024.

DUTRA, L.M.; TELES, P. H. V.; SANTOS, A. D. DA C. ^1H NMR-based metabolic profile and chemometric analysis for the discrimination of *Passiflora* species genotypic variations. **Food Research International**, v. 16, n. 112441, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112441>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963996922014995?via%3Dihub>. Acesso em: 02 fev 2025.

EMWAS, A. H.; SACCENTI, E.; GAO, X.; MCKAY, R. T.; DOS SANTOS, V. A. P. M.; 2, ROY, R.; WISHART, D. S. Recommended strategies for spectral processing and post-processing of 1D ^1H -NMR data of biofluids with a particular focus on urine. **Metabolomics**, v. 14, n. 3, p. 1-23, 2018. DOI: 10.1007/s11306-018-1321-4. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29479299/>. Acesso em: 24 fev 2025.

FERNIE, A. R.; STITT, M. (2012). On the Discordance of Metabolomics with Proteomics and Transcriptomics: Coping with Increasing Complexity in Logic, Chemistry, and Network Interactions Scientific Correspondence. **Plant Physiology**, v. 158, n. 3, p. 1139–1145, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.112.193235>. Disponível em: <https://academic.oup.com/plphys/article-abstract/158/3/1139/6109138?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 09 fev 2025.

FOLIN, O.; CIOCALTEAU, V.; J. On determinations of tyrosine and tryptophan in proteins. **Journal of Biological Chemistry**, v. 73, n. 62, p. 627-650, 1927.

JHA, C. K.; SINHA S.K.; THAKUR, S.K.; KUMAR, V. Soil properties, productivity and juice quality of sugarcane through integration of organic and inorganic nutrient sources in calcareous soil. **International Journal of Chemical Studies**, v. 6, p. 297-302, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/356251124_Soil_properties_productivity_and_juice_quality_of_sugarcane_through_integration_of_organic_and_inorganic_nutrient_sources_in_calcareous_soil. Acesso em: 12 jan 2025.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. **Extract and visualize the results of multivariate data analyses. R package version 1.0.7**. 2020. DOI: <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>. Disponível em: <http://www.sthda.com/english/rpkgs/factoextra>. Acesso em: 12 fev 2025.

KIM, H. K.; CHOI, Y. H.; VERPOORTE, R.. NMR-based metabolomic analysis of plants. **Nature Protocols**, v. 5, p. 536–549, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1038/nprot.2009.237>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nprot.2009.237>. Acesso em: 16 fev 2025.

LÊ, S., JOSSE, J., HUSSON, F. (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis **Journal of Statistical Software**, v. 25, n. 1, p. 1–18, 2008. DOI: <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>. Disponível em: <https://www.jstatsoft.org/article/view/v025i01>. Acesso em: 19 fev 2025.

MACHADO JÚNIOR, G. R.; RAIZER, A. J.; BRESSIANI, J. A.; DE OLIVEIRA, R. A.; DA SILVA, F. C.; LANDELL, M. G. DE A.; FREIRE, F. J.; VIOLANTE, M. **Inovação e desenvolvimento em cana-de-açúcar: manejo, nutrição, bioinsumos, recomendação de corretivos e fertilizantes**. Brasília, DF: Embrapa; Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, cap. 3, p. 61-159, 2024.

MAPBIOMAS, Plataforma MapBiomias. **MapBiomias** – Infográficos dos dados de uso e cobertura da terra do Brasil e de cada bioma da Coleção 7.1 do MapBiomias, 2025. Disponível em: <http://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/Infograficos/Cole%C3%A7%C3%A3o%207.1/MBI-Infograficos-7.1-cerrado-BR.jpg>. Acesso em: 09 jun. 2023.

MANICKAM, S.; RAJAGOPALAN, V. R.; KAMBALE, R.; RAJASEKARAN, R.; KANAGARAJAN, S.; MUTHURAJAN, R. Plant metabolomics: current initiatives and future prospects. **Current Issues in Molecular Biology**., v. 8, n. 45, p. 8894-8906, 2023 DOI: 10.3390/cimb45110558. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37998735/>. Acesso em: 06 fev 2025.

Miller, G.L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Journal of Analytical Chemistry**, v. 31, p. 426-428, 1959. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ac60147a030>. Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1408039>. Acesso em: 24 fev 2025.

MARAFON, A. C. **Análise quantitativa de crescimento em cana-de-açúcar: uma introdução ao procedimento prático**. Embrapa Tabuleiros Costeiros. Aracaju, ed. 1, p. 13-25, 2012.

NASCIMENTO, M. A. **Eficiência produtiva e econômica de variedades de cana-de-açúcar submetidas a diferentes épocas de adubação foliar**. Areia, Paraíba. 2023. 53f. Orientador: Fábio Mielezrski. Trabalho de graduação (Obtenção do título de Engenheira Agrônoma) - Universidade Federal da Paraíba, Paraíba. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/>. Acesso em: 03 jan 2025.

OLIVA, F. A.; JACOMETTI, S. Análise de variedades de cana-de-açúcar: Um estudo sobre a competitividade. **Revista Alomorfia**, v. 7, n. 4, p. 800-809, 2023. Disponível em: <https://www.alomorfia.com.br/index.php/alomorfia/article/view/216>. Acesso em: 23 fev 2025.

OLIVEIRA, A. R.; BRAGA, M. B.; SANTOS, B. L. S.; WALKER, A. M. Biometria de cultivares de cana-de-açúcar sob diferentes reposições hídricas no vale do submédio São Francisco. **Energia Agricultura**, v. 31, n. 1, p. 48-58, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.17224/EnergAgric.2016v31n1p48-58>. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/1900#:~:text=Assim%2C%20este%20trabalho%20teve%20como%20objetivo%20analisar%20as,estresse%20h%C3%ADrico%2C%20no%20Vale%20do%20Subm%C3%A9dio%20S%C3%A3o%20Francisco>.

Acesso em: 14 fev 2025.

OLIVEIRA FILHO, J. H.; BORTOLETTO, A. M.; ALCARDE, A. R. Qualidade pós-colheita de colmos de cana armazenados e seus reflexos na produção de cachaça. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 19, n 2015069, p. 1-9, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1981-6723.6915>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjft/a/66hrs8P99hcfpdKkBpkyH4y/?lang=pt> . Acesso em: 25 jan 2025.

RAVEENDRAN. (2023). Plant Metabolomics: Current Initiatives and Future Prospects. *Current Issues in Molecular Biology*. 45. 8894-8906. 10.3390/cimb45110558.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing**, 2024, Vienna, Austria. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 20 fev 2025.

SCHLOERKE, B.; COOK, D.; LARMARANGE, J.; BRIATTE, F.; MARBACH, M.; THOEN, E.; ELBERG, A.; CROWLEY, J. GGally: **Extension to 'ggplot2'. R package version 2.1.2**. 2021. DOI: 10.32614/CRAN.package.GGally. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/GGally/index.html>. Acesso em: 12 fev 2025.

SILVA, G. S. P. L.; SILVA, F. C.; ALVES, B. J. R.; TOMAZ, E.; BERTON, R. S.; MARCHIORI, L. F. S.; SILVEIRA, F. G. S. Efeitos da aplicação de vinhaça “*in natura*” ou concentrada associada ao n-fertilizante em soqueira de cana-de-açúcar e no ambiente. **Holos Environment**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 1-21, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/holos.v19i1.12212>. Disponível em: <https://www.cea-unesp.org.br/holos/article/view/12212>. Acesso em: 24 fev 2024.

SILVA, J. H. B.; DE ALMEIDA, L. J. M.; SILVA, E. DE S.; BARBOZA, J. B.; FARIAS, GÉISA, E. S.; DANTAS, E. DOS A.; DA SILVA, J. L. C.; DA SILVA, R. A.; DA SILVA, A. M.; CAVALCANTE, I. E.; BATISTA, A. M. A.; DA SILVA, A. V.; TOLEDO, L. C. M. Uso de vinhaça concentrada e enriquecida como biofertilizante na cana-de açúcar: uma revisão. **Scientific Electronic Archives**, v. 16, n. 2, p. 1-8, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.36560/16220231651>. Disponível em: <https://sea.ufr.edu.br/SEA/article/view/1651>. Acesso em: 25 jan 2025.

SILVA, M. C. A. C. **Cana-de-açúcar: manejo, ecologia e biomassa**. Bauru, SP: Spessotto, 208 p. E-book. 2021

SILVA, M. M. P. **Caracterização da produção e avaliação de indicadores de qualidade tecnológica de amostras de melado do estado de São Paulo**. São Paulo, SP. 2012. 57 f. Dissertação (Mestrado em Agroecologia e Desenvolvimento Rural) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/135/4648.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 23 mar. 2025.

SILVA, T. G. F.; DE MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; DO CARMO, J. F. A.; DE

SOUZA, L. S. B. Biometria da parte aérea da cana soca irrigada no Submédio do Vale. do São Francisco. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 3, p. 500-509, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902012000300012>. Disponível em: <https://locus.ufv.br/items/0941aced-aba8-49c8-8a42-f959cb369941>. Acesso em: 14 mar 2025.

ROVIERO, J. P.; FREITA, C. M.; FERREIRA, C. L. Biometria de variedades de cana-de-açúcar no ambiente de produção da FAEXP na UEMG unidade Ituiutaba-MG. In: Anais do Simpósio de Tecnologia Fatec Jaboticabal (SITEC-JB), 2023, Jaboticabal. **Anais [...]**. Jaboticabal: Simpósio de Tecnologia Fatec Jaboticabal – Campus Jaboticabal, p. 13-18, 2023. DOI: <https://doi.org/10.52138/sitec.v13i1.318>. Disponível em: <https://publicacoes.fatecjaboticabal.edu.br/sitec/article/view/318>. Acesso em: 08 mai 2024.

WECKWERTH, W. Metabolomics: An integral technique in systems biology. **BioAnalysis**, v. 6, n. 9, p. 1661–1678, 2010. DOI: <https://doi.org/10.4155/bio.09.192>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21083277/>. Acesso em: 20 fev 2025.

WHEELER, R. M.; CARGNIN, J. M. R.; DUTRA, A. R. DE A.; CUBAS, A. L. V.; MOECKE, E. H. S.; JOÃO, J. J. Potenciais aplicações da vinhaça da cana-de-açúcar visando a produção mais limpa: uma revisão integrativa. In: IX ENSUS – Encontro de Sustentabilidade em Projeto, 9, 2021, Florianópolis. **Anais [...]** Florianópolis: UFSC, 2021, p. 316-327. DOI: <https://10.22533/at.ed.25921230810>. Disponível em: <https://atenaeditora.com.br/catalogo/post/potenciais-aplicacoes-da-vinhaca-da-cana-de-acucar-visando-a-producao-mais-limpa-uma-revisao-integrativa>. Acesso em: 02 dez 2023.

XIA, J.; WISHART, D. S. (2011). Metabolomic data processing, analysis, and interpretation using MetaboAnalyst. **Current Protocols in Bioinformatics**, v. 14, n. 10, p. 1-14, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/0471250953.bi1410s34>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21633943/>. Acesso em: 01 mar 2025.

YUAN, Z.; DONG, F.; PANG, Z.; FALLAH, N.; ZHOU, Y.; LI, Z.; HU, C. Integrated metabolomics and transcriptome analyses unveil pathways involved in sugar content and rind color of two sugarcane varieties. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, n. 15, p. 1-19, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.921536>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2022.921536/full>. Acesso em: 21 fev 2025.

ANEXOS

LISTA DE SIGLAS

ART – Açúcar redutor total
ASC – Acidez sulfúrica
B – Brix
BFN – Bactérias fixadoras de nitrogênio
BSK – Bactérias solubilizadoras de potássio
BSP – Bactérias solubilizadoras de fósforo
BT – Bactérias Totais
CB – Carbono de biomassa
CC – Capacidade de campo
CE – Condutividade elétrica
CF3 – Comprimento folha +3
CMC – Comprimento do colmo
CNA – Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil
CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento
COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental
COS – Carbono Orgânico do solo
CP – Comprimento do palmito
CTC – Centro Tecnologia Canavieira
DBC – Diâmetro da base do colmo
DPC – Diâmetro da ponta do colmo
FAO – Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação
Fen – Fenol
Fru – Frutose
FT – Fungos totais
G – Glicose
IM – Índice de maturação
LTM – Largura terço médio
MFA – Massa foliar antes
MFD – Massa foliar depois
N3 – Nitrogênio foliar 3 meses
N6 – Nitrogênio foliar 6 meses
NE – Número de entrenós
NFAC – Nitrogênio foliar antes da colheita
NFS – Número de folhas secas
NFV – Número de folhas verdes
NN – Número de nós
P10 – Perfilho em 10 touceiras
P10C - Peso 10 colmos antes
PCA – Análise de componentes principais
PCD – Peso de 10 colmos depois
pHC -pH caldo
qCO₂ – Quociente metabólico
qMic – Quociente microbiano

RBS – Respiração basal do solo

S - Sacarose

SB – Soma de Bases

SIAMIG – Associação da Indústria da Bioenergia e do Açúcar de Minas Gerais

TBH – Tonelada de brix por hectare

SX – Sacarose no brix

TCA – Ácido tricarboxílico

TCH – Tonelada de colmo por hectare

TFSA – Terra fina seca ao ar

V% – Saturação de bases