

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
UNESP - CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÔNOMICA

**PROFUNDIDADE EFETIVA DE RAIZ DE CANA-DE-AÇÚCAR EM ÁREA IRRIGADA E
EM SEQUEIRO**

GUILHERME AUGUSTO MAZUCHI ORSOLINI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia da Unesp - Câmpus
de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para
obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo.

ILHA SOLTEIRA - SP
JUNHO DE 2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
UNESP - CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÔNOMICA

**PROFUNDIDADE EFETIVA DE RAIZ DE CANA-DE-AÇÚCAR EM ÁREA IRRIGADA E
EM SEQUEIRO**

GUILHERME AUGUSTO MAZUCHI ORSOLINI

Orientador: Prof. Dr. Fernando Braz Tangerino Hernandez

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia da Unesp - Câmpus
de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para
obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo.

ILHA SOLTEIRA - SP
JUNHO DE 2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- O76p Orsolini, Guilherme Augusto Mazuchi.
Profundidade efetiva de raiz de cana-de-açúcar em área irrigada e em sequeiro / Guilherme Augusto Mazuchi Orsolini. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
45 f. : il.
- Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2026
- Orientador: Fernando Braz Tangerino Hernandez
- Inclui bibliografia
1. Saccharum spp.. 2. Produtividade de colmos. 3. Perfil do solo. 4. Manejo hídrico. 5. Capacidade de água disponível.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE ENGENHARIA AGRONÔMICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: Profundidade efetiva de raiz de cana-de-açúcar em área irrigada e em sequeiro

ALUNO: *Guilherme Augusto Mazuchi Orsolini* RA:

ORIENTADOR: Fernando Braz Tangerino Hernandez

Aprovado (X) - Reprovado () pela Comissão Examinadora com Nota: 9,0 (Nove)

Comissão Examinadora:



Prof. Dr. Fernando Braz Tangerino Hernandez
Presidente (Orientador)



Documento assinado digitalmente
DIEGO GONCALVES FEITOSA
Data: 15/06/2026 11:23:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Diego Gonçalves Feitosa

Documento assinado digitalmente



MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO
Data: 15/06/2026 15:00:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho

Documento assinado digitalmente



GUILHERME AUGUSTO MAZUCHI ORSOLINI
Data: 18/06/2026 12:23:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Guilherme Augusto Mazuchi Orsolini

Ilha Solteira, 12 de junho de 2026.

RESUMO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) apresenta elevada importância produtiva no Noroeste Paulista, região marcada por alta demanda evapotranspirativa e distribuição irregular das chuvas. Este trabalho partiu da hipótese de que o manejo hídrico altera a produtividade de colmos e a distribuição do sistema radicular, com maior concentração de raízes nas camadas superficiais em área irrigada e maior exploração relativa em profundidade no sequeiro. O objetivo foi analisar a distribuição do sistema radicular da variedade RB 98 5476 em área irrigada por pivô central e em sequeiro, nos 3º e 4º cortes, relacionando os resultados à produtividade e à capacidade de água disponível no solo. O estudo foi realizado em Nova Independência, SP, em solo de textura média e classe textural franco-argiloarenosa, com predominância de areia. Foram avaliados área superficial, volume, diâmetro e número de fibras radiculares pelo método do perfil, com imagens processadas no SAFIRA, além da tonelada de colmos por hectare (TCH), precipitação, irrigação, atributos físicos e químicos do solo e capacidade de água disponível (CAD). No 3º corte, a TCH foi de 135,1 t/ha no irrigado e 99,3 t/ha no sequeiro, diferença de 35,8 t/ha, equivalente a 36,1% de incremento no irrigado, no 4º corte, foi de 124,3 e 93,8 t/ha, diferença de 30,5 t/ha, equivalente a 32,5% de incremento. A maior concentração de raízes ocorreu nas camadas superficiais, principalmente de 0 a 20 cm no irrigado e de 20 a 40 cm no sequeiro. A profundidade efetiva do sistema radicular (PESR), definida pelo acúmulo de 80% das raízes, foi de 40 cm em ambos os manejos, sem aprofundamento entre cortes. Recomenda-se utilizar PESR de 0,4 m para o cálculo da CAD nas condições avaliadas.

Termos para indexação: *Saccharum spp.*, produtividade de colmos, perfil do solo, manejo hídrico, capacidade de água disponível.

ABSTRACT

Sugarcane (*Saccharum spp.*) has high productive importance in northwestern São Paulo State, Brazil, a region characterized by high evapotranspiration demand and irregular rainfall distribution. This study was based on the hypothesis that water management changes stalk yield and root system distribution, with greater root concentration in the upper soil layers under irrigation and greater relative exploration at depth under rain-fed conditions. The objective was to analyze the root system distribution of variety RB 98 5476 under center-pivot irrigation and rain-fed conditions in the 3rd and 4th ratoon crops, relating the results to yield and soil available water capacity. The study was conducted in Nova Independência, São Paulo State, Brazil, in a medium-textured soil classified as sandy clay loam, with sand predominance. Root surface area, volume, diameter and number of fibers were evaluated using the soil profile method, with images processed in SAFIRA, in addition to stalk yield (TCH, tons of stalks per hectare), rainfall, irrigation depth, soil physical and chemical attributes and soil available water capacity (CAD). In the 3rd ratoon crop, TCH was 135.1 t/ha in the irrigated area and 99.3 t/ha under rain-fed conditions, a difference of 35.8 t/ha, equivalent to a 36.1% increase under irrigation, in the 4th ratoon crop, values were 124.3 and 93.8 t/ha, a difference of 30.5 t/ha, equivalent to a 32.5% increase. The highest root concentration occurred in the upper soil layers, mainly from 0 to 20 cm under irrigation and from 20 to 40 cm under rain-fed conditions. The effective root system depth (PESR), defined by the accumulation of 80% of the roots, was 40 cm in both water management systems, with no deepening between ratoon crops. PESR of 0.4 m is recommended for CAD calculation under the evaluated conditions.

KEYWORDS: *Saccharum spp.*, stalk yield, soil profile method, water management, soil available water capacity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Granulometria do solo nas áreas irrigada e de sequeiro	18
Figura 2 - Teor de P-resina e pH em profundidade nas áreas irrigada e de sequeiro	21
Figura 3 - Produtividade de colmos nos 3º e 4º cortes	24
Figura 4 - Perfis analisados na área irrigada.....	26
Figura 5 - Perfis analisados no sequeiro	27
Figura 6 - Percentual acumulado por profundidade no 3º corte	29
Figura 7 - Perfis do solo irrigado.....	32
Figura 8 - Perfis do solo em sequeiro	33
Figura 9 - Percentual acumulado por profundidade no 4º corte	35
Figura 10 - Relação 3º/4º corte dos atributos radiculares na área irrigada	37
Figura 11 - Diâmetro das raízes irrigadas entre o 3º e o 4º corte.....	38
Figura 12 - Relação 3º/4º corte dos atributos radiculares no sequeiro	39
Figura 13 - Diâmetro das raízes no sequeiro entre o 3º e o 4º corte.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise química do solo.....	21
Tabela 2 - Atributos radiculares da área irrigada no 3º corte.....	25
Tabela 3 - Atributos radiculares no sequeiro no 3º corte	25
Tabela 4 - Percentuais por camada dos atributos radiculares na área irrigada no 3º corte	28
Tabela 5 - Percentuais por camada dos atributos radiculares no sequeiro no 3º corte	28
Tabela 6 - Médias dos atributos radiculares no 3º corte	29
Tabela 7 - Atributos radiculares da área irrigada no 4º corte.....	31
Tabela 8 - Atributos radiculares no sequeiro no 4º corte	31
Tabela 9 - Médias dos atributos radiculares no 4º corte	34
Tabela 10 - Dados médios do 3º e 4º cortes na área irrigada.....	36
Tabela 11 - Dados médios do 3º e 4º cortes no sequeiro	36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 REVISÃO DE LITERATURA	10
2.1 Cana-de-açúcar, disponibilidade hídrica e irrigação	10
2.2 Importância da irrigação na cana-de-açúcar	11
2.3 Sistema radicular e profundidade efetiva	12
2.4 Métodos de avaliação de raízes	13
2.5 Atributos do solo e crescimento radicular	14
3 MATERIAL E MÉTODOS	16
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
5 CONCLUSÕES	41
REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma das culturas agrícolas de maior importância econômica e energética no Brasil, por sua participação na produção de açúcar, etanol, bioenergia e subprodutos utilizados em diferentes cadeias agroindustriais. No Estado de São Paulo, especialmente em regiões de expansão e consolidação do setor sucroenergético, a cultura ocupa extensas áreas e exerce papel relevante na economia regional. No Noroeste Paulista, essa importância produtiva convive com condições climáticas marcadas por elevada demanda atmosférica e distribuição irregular das chuvas, o que torna a disponibilidade de água um dos principais fatores associados ao desempenho da cultura (CARVALHO, 2021, SANTOS, HERNANDEZ, ROSSETTI, 2010).

A resposta da cana-de-açúcar à água disponível no solo é diretamente influenciada pelo estágio de desenvolvimento, pela variedade, pelo tipo de solo, pelo sistema de produção e pelo manejo adotado. Em ambientes com períodos prolongados de deficiência hídrica, o estresse pode reduzir perfilhamento, crescimento dos colmos, acúmulo de biomassa e produtividade final (FARIAS *et al.*, 2008, TAIZ *et al.*, 2017). Para a região Noroeste Paulista, Bispo, Hernandez e Teixeira (2018) indicam que as fases de perfilhamento e crescimento de colmos e os meses entre julho e outubro representam períodos críticos quanto à deficiência hídrica, reforçando a necessidade de estratégias de reposição de água para evitar perdas produtivas.

No presente estudo, a irrigação foi tratada como uma prática ligada à estabilidade do canavial e ao aproveitamento do potencial produtivo da variedade RB 98 5476. A comparação entre as áreas irrigada e de sequeiro, nos 3º e 4º cortes, permite relacionar o fornecimento de água com as diferenças observadas na TCH e na distribuição do sistema radicular. Essa resposta não depende apenas da presença ou ausência de irrigação, mas também do manejo da lâmina, da adubação, da idade do corte, da cultivar e das condições edafoclimáticas locais (DALRI *et al.*, 2008, GAVA *et al.*, 2011, LOPES SOBRINHO *et al.*, 2019). Por isso, o manejo da irrigação deve buscar equilíbrio entre reposição hídrica, custo operacional e aproveitamento da água aplicada (LOPES SOBRINHO *et al.*, 2019).

O manejo adequado da irrigação depende da estimativa da demanda hídrica da cultura e da capacidade do solo em armazenar e disponibilizar água às raízes. A evapotranspiração de referência, os coeficientes de cultura e a evapotranspiração atual são variáveis utilizadas para quantificar a necessidade de água ao longo do ciclo (ALLEN *et al.*, 1998, AVILEZ *et al.*, 2018). Mais recentemente, o uso de sensoriamento remoto e de algoritmos como o SAFER tem permitido estimar a evapotranspiração em escala espacial, contribuindo para avaliar o

comportamento hídrico de áreas irrigadas e de sequeiro na região Noroeste Paulista (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Para o manejo da irrigação, a lâmina aplicada precisa ser relacionada à profundidade realmente explorada pelas raízes. Nesse sentido, a profundidade efetiva do sistema radicular foi considerada no presente trabalho por interferir diretamente no cálculo da capacidade de água disponível no solo e no volume de solo usado pela cultura para absorção de água (BERNARDO *et al.*, 2019). Como a distribuição das raízes pode mudar entre ambientes irrigados e de sequeiro, sua avaliação ajuda a interpretar a resposta da cana-de-açúcar ao manejo hídrico e às limitações físicas e químicas do solo (VASCONCELOS *et al.*, 2003, TAIZ *et al.*, 2017).

Com base nessa abordagem, este trabalho teve como objetivo analisar a distribuição do sistema radicular e a produtividade de colmos da cana-de-açúcar, variedade RB 98 5476, em áreas irrigada e de sequeiro, nos 3º e 4º cortes, avaliando área superficial, volume, diâmetro e quantidade de fibras radiculares ao longo do perfil do solo, com ênfase na determinação da profundidade efetiva das raízes.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cana-de-açúcar, disponibilidade hídrica e irrigação

A cana-de-açúcar demanda água durante todo o ciclo, com maior sensibilidade nas fases de perfilhamento, alongamento dos colmos, expansão foliar e acúmulo de biomassa. Em regiões com distribuição irregular das chuvas, a limitação de água no solo pode reduzir a abertura estomática, a fotossíntese e a taxa de crescimento, comprometendo a produtividade agrícola e a qualidade da matéria-prima. Flexas *et al.* (2006) demonstraram que, sob estresse hídrico, a redução da atividade fotossintética está associada à baixa condutância estomática e à menor concentração de CO₂ nos cloroplastos, o que reforça a relação entre déficit hídrico e limitação fisiológica das plantas (FARIAS *et al.*, 2008, TAIZ *et al.*, 2017).

Em ambientes com déficit hídrico prolongado, a produtividade pode ser limitada pela baixa disponibilidade de água no solo, sobretudo quando o estresse ocorre em fases de intensa expansão vegetativa. Bispo, Hernandez e Teixeira (2018), ao avaliarem o balanço hídrico da cana-de-açúcar no Noroeste Paulista, destacaram que os menores valores de consumo relativo de água ocorreram nas fases de perfilhamento e crescimento dos colmos, indicando maior risco de perdas quando a deficiência hídrica coincide com essas etapas. Os autores também observaram que, entre junho e outubro, a deficiência hídrica no solo tende a ser mais acentuada.

No manejo irrigado, a lâmina aplicada não deve ser definida apenas pela reposição da evapotranspiração. Ela precisa considerar a eficiência do sistema, a capacidade de armazenamento de água no solo e a profundidade em que se concentra o maior volume de raízes. A estimativa da evapotranspiração da cultura, baseada na evapotranspiração de referência e no coeficiente de cultura, auxilia no ajuste da lâmina ao consumo hídrico ao longo do ciclo (ALLEN *et al.*, 1998). Em áreas como a avaliada neste trabalho, irrigada por pivô central com capacidade de aplicação de 8 mm em 21 h, esse ajuste é necessário para reduzir perdas de água e energia, além de melhorar a eficiência do sistema produtivo (LOPES SOBRINHO *et al.*, 2019).

Para o Noroeste Paulista, Avilez *et al.* (2018) verificaram que a necessidade hídrica total da cana-de-açúcar variou de 1000 a 1600 mm por safra, dependendo da duração do ciclo, enquanto a necessidade diária variou entre 3,6 e 4,2 mm/dia. Esses valores evidenciam que o manejo da irrigação deve ser realizado com acompanhamento climático e conhecimento das fases da cultura, pois a simples ocorrência de precipitação anual aparentemente suficiente não

garante suprimento hídrico adequado quando há má distribuição das chuvas (AVILEZ *et al.*, 2018).

2.2 Importância da irrigação na cana-de-açúcar

A irrigação na cana-de-açúcar tem importância estratégica porque reduz a dependência da distribuição natural das chuvas e permite maior regularidade no crescimento da cultura. Embora a cana tolere períodos de menor disponibilidade hídrica, sua produtividade é fortemente afetada quando o déficit ocorre durante o perfilhamento e o crescimento dos colmos, fases associadas à formação do estande produtivo e ao acúmulo de matéria seca. Bispo, Hernandez e Teixeira (2018) identificaram essas fases como períodos críticos de deficiência hídrica no Noroeste Paulista, com necessidade de reposição de água para evitar decréscimo de produtividade. Assim, a irrigação contribui para estabilizar a produção em anos de seca, reduzir riscos climáticos e favorecer melhor aproveitamento do potencial genético das cultivares (LOPES SOBRINHO *et al.*, 2019).

Lopes Sobrinho *et al.* (2019) ressaltam que a irrigação deve ser interpretada juntamente com clima, solo, variedade, sistema de cultivo e retorno econômico. No presente estudo, essa leitura auxilia a interpretar a lâmina aplicada junto com a profundidade explorada pelas raízes, a fertilidade do perfil e o manejo de adubação. A irrigação, portanto, não se resume ao fornecimento de água, ela precisa alcançar a camada em que a cultura concentra maior atividade radicular.

Resultados experimentais demonstram que a resposta produtiva da cana-de-açúcar à irrigação pode variar conforme o manejo e a cultivar. Dalri *et al.* (2008), avaliando irrigação por gotejamento subsuperficial, observaram efeitos positivos da irrigação sobre produção e qualidade da cana-de-açúcar. De forma semelhante, Gava *et al.* (2011) verificaram diferenças de produtividade entre cultivares conduzidas em sequeiro e sob irrigação por gotejamento, demonstrando que o fornecimento de água pode alterar o desempenho produtivo, mas que a magnitude da resposta depende do material genético e das condições de cultivo.

No Noroeste Paulista, a irrigação ganha relevância adicional pela combinação entre alta evapotranspiração e concentração das chuvas em poucos meses do ano. Santos, Hernandez e Rossetti (2010) apontam o balanço hídrico como ferramenta de planejamento agropecuário para a região, pois ele permite identificar períodos de excedente e deficiência hídrica. Bispo, Hernandez e Teixeira (2018) reforçam que, mesmo em áreas com precipitação anual expressiva,

a distribuição irregular das chuvas pode impor déficit ao solo justamente em fases sensíveis da cana-de-açúcar.

O estudo de Oliveira *et al.* (2021) evidenciou que o sensoriamento remoto pode auxiliar no acompanhamento da demanda de água em cana-de-açúcar irrigada por pivô central. Os autores estimaram a evapotranspiração atual e a relação ETa/ETo por meio do algoritmo SAFER em 84 ha, localizada na mesma área deste trabalho. Os maiores valores de ETa ficaram entre 3,4 e 4,4 mm/dia, enquanto a relação ETa/ETo atingiu valores entre 0,7 e 0,8 nos períodos de maior desenvolvimento vegetativo.

Esses resultados indicam que o consumo de água acompanha a dinâmica de crescimento da cultura, sendo menor no início do ciclo, quando a cobertura vegetal ainda é reduzida, e maior durante a fase de grande crescimento. Oliveira *et al.* (2021) também observaram que, mesmo em área irrigada, ocorreram dias em que o solo entrou em condição de reserva ou déficit hídrico durante a fase de grande crescimento, o que reforça a necessidade de monitoramento contínuo. Dessa forma, a irrigação eficiente exige integração entre dados climáticos, condição da cultura, armazenamento de água no solo e capacidade operacional do sistema instalado (ALLEN *et al.*, 1998).

A relação entre irrigação e sistema radicular é central para o presente trabalho. A lâmina de água aplicada só será plenamente aproveitada se alcançar a região de maior concentração de raízes ativas, sem exceder a capacidade de armazenamento do solo na zona explorada (BERNARDO *et al.*, 2019). Por isso, a determinação da profundidade efetiva do sistema radicular permite ajustar o manejo da irrigação, estimar a capacidade de água disponível e interpretar diferenças entre cana irrigada e de sequeiro. Em áreas irrigadas, a tendência de maior disponibilidade de água nas camadas superficiais pode concentrar raízes próximas à linha de cultivo, já em condições de sequeiro, a busca por água pode estimular maior exploração em profundidade, dependendo das limitações físicas e químicas do solo (TAIZ *et al.*, 2017).

2.3 Sistema radicular e profundidade efetiva

O sistema radicular é responsável pela absorção de água e nutrientes e exerce papel direto na adaptação da planta às condições edáficas. Paulilo, Viana e Randi (2015) descrevem que o contato entre raízes e nutrientes ocorre por interceptação radicular, fluxo de massa e difusão, mecanismos que dependem tanto do crescimento das raízes quanto da disponibilidade de água no solo. Em culturas perenes ou semiperenes, como a cana-de-açúcar, a arquitetura

radicular também influencia a capacidade da planta em explorar diferentes camadas ao longo dos cortes (VASCONCELOS *et al.*, 2003).

A profundidade efetiva corresponde à faixa do solo em que se concentra uma parcela previamente definida das raízes ativas. Neste trabalho, adotou-se o critério de 80% do total acumulado de raízes no perfil, por representar a porção do solo mais relevante para absorção de água e para o manejo da irrigação. Bernardo *et al.* (2019) relacionam esse conceito à definição da profundidade de controle da umidade e à estimativa da lâmina que o solo consegue armazenar e disponibilizar à cultura. Quando se adota uma profundidade maior que a realmente explorada pelas raízes, parte da água aplicada pode ultrapassar a zona de maior absorção, quando se adota profundidade menor, a irrigação pode não atender ao volume de solo utilizado pela planta.

Em condições de menor disponibilidade hídrica, as plantas tendem a alterar a alocação de fotoassimilados e a exploração do solo. Taiz *et al.* (2017) destacam que o desenvolvimento radicular pode ser modificado por estresses ambientais, incluindo a deficiência hídrica. Na cana-de-açúcar, esse comportamento pode resultar em mudanças na distribuição de raízes entre camadas superficiais e profundas, especialmente quando o manejo de água difere entre áreas irrigadas e de sequeiro.

2.4 Métodos de avaliação de raízes

Entre os métodos utilizados para estudar raízes, destacam-se monólito, trado, sonda e perfil do solo. O método do monólito permite retirar blocos de solo com raízes, mas exige maior tempo de coleta e preparo. O trado e a sonda possibilitam amostragens pontuais e repetidas, porém representam volumes menores de solo e podem dificultar a visualização da distribuição lateral das raízes. O método do perfil, por sua vez, expõe a parede da trincheira e permite observar a distribuição vertical e horizontal do sistema radicular em relação à linha de cultivo. Para o objetivo deste trabalho, esse método foi o mais adequado por permitir comparar camadas e posições de amostragem, além de gerar imagens compatíveis com o processamento no SAFIRA. Vasconcelos *et al.* (2003) destacaram essa vantagem ao comparar métodos de avaliação de raízes de cana-de-açúcar. Silva-Olaya, Cerri e Cerri (2017) também apontaram as dificuldades de amostragem do sistema radicular e observaram redução da biomassa radicular com o aumento da profundidade, aspecto importante para a definição da profundidade efetiva.

No método do perfil com imagens digitais, a abertura de trincheiras permite expor o perfil transversal ao cultivo e registrar a distribuição das raízes por camadas. Após o

processamento das imagens, programas específicos quantificam variáveis como área superficial, volume, diâmetro e número de fibras. O programa SAFIRA, desenvolvido pela Embrapa Instrumentação, é utilizado para análise de fibras e raízes em imagens digitais, permitindo padronizar a identificação e a mensuração de estruturas radiculares (JORGE, SILVA, 2010).

Apesar de sua utilidade, a análise por imagens depende de cuidados metodológicos, como limpeza adequada do perfil, contraste entre raízes e solo, padronização da distância de captura e calibração correta da escala. Pequenas variações no preparo do perfil podem alterar a identificação automática das raízes, especialmente em camadas com maior teor de matéria orgânica, resíduos culturais ou agregados aderidos. Por isso, a interpretação dos resultados deve considerar tanto os dados numéricos quanto a consistência visual das imagens (VASCONCELOS *et al.*, 2003, JORGE, SILVA, 2010).

A escolha do método de avaliação deve estar alinhada ao objetivo do estudo. Para pesquisas voltadas à irrigação, o método do perfil é útil porque permite identificar a profundidade de maior concentração radicular e comparar a distribuição entre manejos (VASCONCELOS *et al.*, 2003). Para esse estudo, essa abordagem possibilita relacionar a distribuição de raízes da cana-de-açúcar com os ambientes irrigado e de sequeiro, contribuindo para discutir a profundidade efetiva e o aproveitamento da água no solo.

2.5 Atributos do solo e crescimento radicular

Além da disponibilidade de água, atributos químicos e físicos do solo interferem no crescimento radicular. A compactação pode restringir a expansão das raízes, reduzir a macroporosidade e dificultar a infiltração e o armazenamento de água. Em camadas mais adensadas, as raízes podem apresentar maior diâmetro e menor alongamento, o que limita a exploração do perfil e reduz a eficiência da absorção de água e nutrientes (BENNIE, BOTHA, 1986).

A fertilidade do solo também condiciona a distribuição radicular, pois define o ambiente químico explorado pelas raízes. A correção da acidez, a disponibilidade de cálcio e magnésio em profundidade, a presença de alumínio trocável e o equilíbrio entre nutrientes influenciam o alongamento radicular, a formação de raízes finas e a tolerância das plantas a períodos de deficiência hídrica. Quaggio *et al.* (1993) demonstraram que práticas de correção química podem alterar a distribuição de íons no perfil do solo, favorecendo melhores condições para o crescimento radicular em profundidade.

A disponibilidade de fósforo também interfere na interpretação do sistema radicular, principalmente porque esse nutriente apresenta baixa mobilidade no solo e depende do contato com as raízes para ser absorvido. Abichequer, Bohnen e Anghinoni (2003) observaram diferenças de absorção e utilização de fósforo em plantas submetidas a condições de estresse, reforçando a ligação entre crescimento radicular e eficiência nutricional. Em canaviais, uma distribuição mais ampla das raízes pode aumentar o volume de solo explorado e melhorar o aproveitamento dos nutrientes aplicados.

Como este trabalho compara áreas com e sem irrigação, a distribuição das raízes foi interpretada juntamente com o manejo hídrico e com as condições físicas e químicas do solo. Em área irrigada, a reposição mais frequente de água pode concentrar raízes nas camadas superficiais quando água e nutrientes estão mais disponíveis nessa região. No sequeiro, a menor disponibilidade de água na superfície pode favorecer maior exploração em profundidade, desde que o perfil não apresente impedimentos físicos ou químicos relevantes (BENNIE, BOTHA, 1986, QUAGGIO *et al.*, 1993, TAIZ *et al.*, 2017).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em área comercial localizada no município de Nova Independência, SP, nas coordenadas geográficas 21° 01' 29" S e 51° 23' 52" O, com altitude de 338 m. Foram avaliadas duas condições de manejo hídrico: uma área conduzida em sequeiro e outra irrigada por pivô central.

A área irrigada foi composta por um sistema de irrigação pivô central com área de 84 hectares e capacidade de aplicação de 8 mm em 21 horas. O 3º corte compreendeu o período de 11/08/2020 a 02/08/2021, com precipitação acumulada de 754 mm e lâmina de irrigação de 900 mm, enquanto que o 4º corte compreendeu o período de 03/08/2021 a 03/08/2022, com precipitação acumulada de 839 mm e lâmina de irrigação de 842 mm.

O manejo de adubação dos talhões foi caracterizado a partir da planilha operacional, fornecida pela fazenda, considerando os registros de produto, doses, data de aplicação e fornecimento estimado de N, P₂O₅ e K₂O. Essa informação foi incorporada ao estudo porque, em cana-soca, o suprimento de nutrientes participa diretamente da formação de biomassa, da produtividade de colmos e da resposta da cultura ao manejo hídrico, especialmente quando se avaliam ambientes irrigados e de sequeiro (FORTES *et al.*, 2013, LEITE *et al.*, 2016). As aplicações foram descritas conforme o registro operacional disponível, quando o modo de aplicação constava na planilha, ele foi informado no texto.

No 3º corte, correspondente ao ciclo 2020/2021, o manejo nutricional foi diferenciado entre os talhões avaliados. Nos talhões 71, 73 e 97, classificados como adubação SUPER, aplicou-se vinhaça em agosto de 2020, na dose de 300 m³/ha, seguida de adubações minerais parceladas com 06-30-10 (200 kg/ha), 18-00-17 (220 kg/ha) e 30-00-00 (250 kg/ha). Esse manejo totalizou fornecimento estimado de 157 kg/ha de N, 60 kg/ha de P₂O₅ e 220 kg/ha de K₂O. O talhão 92, representativo do manejo NORMAL no sequeiro, recebeu vinhaça na dose de 300 m³/ha e 30-00-00 na dose de 330 kg/ha, com fornecimento estimado de 129 kg/ha de N e 140 kg/ha de K₂O. Também foi registrada aplicação em linha de calcário e gesso em 08/09/2020, na dose de 370 kg/ha de cada produto. A vinhaça foi considerada parte do manejo nutricional por sua contribuição como fonte de potássio e por seu uso recorrente como complemento ou substituição parcial da adubação mineral em canaviais fertirrigados (BARBOSA *et al.*, 2013, OTTO *et al.*, 2017). Para as demais fontes registradas nesse ciclo, a planilha não detalhava a posição de aplicação, incorporação ou distribuição em linha e entrelinha, por isso a descrição foi mantida conforme o registro operacional disponível.

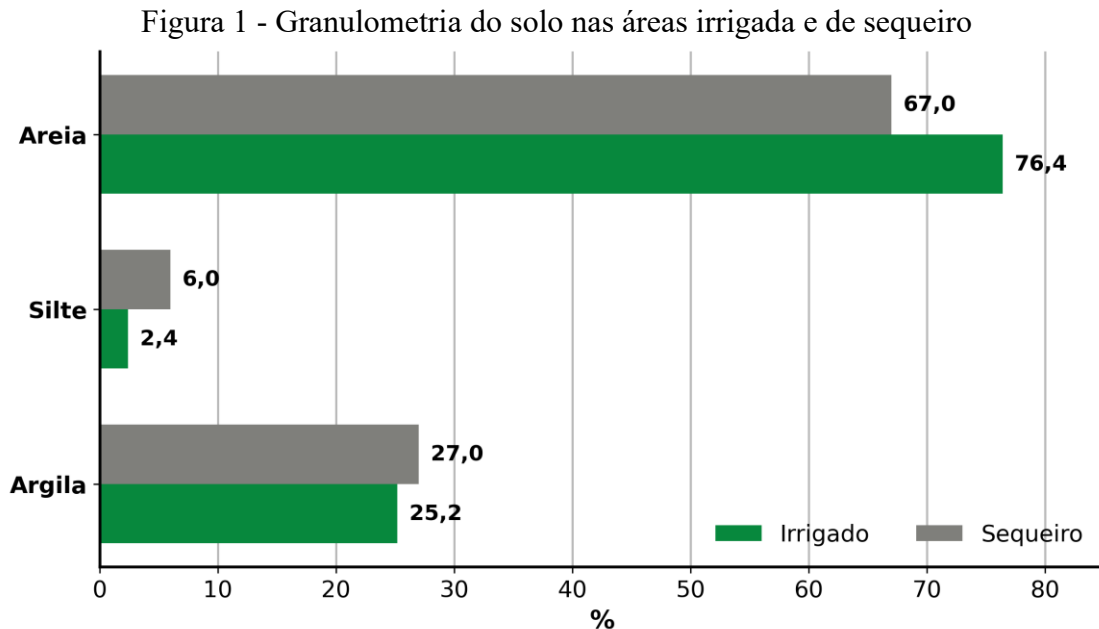
No 4º corte, correspondente ao ciclo 2021/2022, os talhões irrigados avaliados (71 e 73), classificados como adubação SUPER, receberam vinhaça em 21/08/2021, na dose de 110 m³/ha, 06-30-10 em 24/08/2021, na dose de 300 kg/ha, 20-00-22 em 21/02/2022, na dose de 150 kg/ha, e duas aplicações de 46-00-00, na dose de 100 kg/ha cada, em 20/03/2022 e 22/04/2022. O fornecimento estimado para esse manejo foi de 170,8 kg/ha de N, 90 kg/ha de P₂O₅ e 247,8 kg/ha de K₂O. No sequeiro, o talhão 97 recebeu vinhaça na dose de 110 m³/ha e 25-06-00 em 07/08/2021, na dose de 350 kg/ha, totalizando 118,3 kg/ha de N, 21 kg/ha de P₂O₅ e 184,8 kg/ha de K₂O. O talhão 92 recebeu vinhaça na dose de 110 m³/ha e 25-06-00 em 07/08/2021, na dose de 180 kg/ha, totalizando 75,8 kg/ha de N, 10,8 kg/ha de P₂O₅ e 184,8 kg/ha de K₂O. A planilha também registrou aplicação em linha de calcário e gesso em 09/09/2021, na dose de 370 kg/ha de cada produto, além de aplicação de micronutrientes em 24/02/2022, com doses registradas em volume de produto comercial: 2,0 L de fonte de MEA, 3,0 L de fonte de ZnSO₄ e 10,0 L de fonte de MnSO₄. Como a planilha não informava a concentração dos produtos, esses registros não foram convertidos para massa de nutriente. Essa diferenciação de manejo foi mantida na descrição metodológica por auxiliar a interpretação conjunta dos efeitos de água e nutrição sobre raízes e produtividade. Para as fontes minerais e a vinhaça, o registro operacional não informava de forma completa a posição de aplicação ou incorporação, assim, manteve-se a descrição por produto, data, dose e, quando disponível, aplicação em linha.

A produtividade agrícola foi avaliada por meio da tonelada de colmos por hectare (TCH), expressa em t/ha, como variável complementar para relacionar o desempenho produtivo da cultura aos manejos hídrico e nutricional.

A caracterização física do solo foi realizada com base em atributos usados para avaliar o ambiente de crescimento radicular e a disponibilidade de água às plantas. A textura, a densidade aparente e a macroporosidade estão entre os principais indicadores de qualidade física do solo, pois influenciam o arranjo poroso, a aeração, o armazenamento, o movimento de água e a resistência mecânica ao crescimento das raízes (REYNOLDS *et al.*, 2002, DEXTER, 2004, TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Na camada média de 0 a 100 cm, a macroporosidade foi de 30,2% na área irrigada e de 29,9% na área de sequeiro. A densidade aparente média foi de 1,35 g/cm³ na área irrigada e de 1,37 g/cm³ na área de sequeiro. Quanto à composição granulométrica, a área irrigada apresentou 25,2% de argila, 2,4% de silte e 76,4% de areia, enquanto a área de sequeiro apresentou 27,0% de argila, 6,0% de silte e 67,0% de areia. Com base nesses valores, o solo foi

caracterizado como de textura média, com classe textural franco-argiloarenosa e predominância de areia nas duas condições de manejo. Esses dados podem ser observados na Figura 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esses atributos foram considerados porque ajudam a interpretar a distribuição radicular observada nas trincheiras. Em canaviais, variações de porosidade, densidade, resistência mecânica e tráfego de máquinas podem alterar o crescimento das raízes, a exploração do perfil e a produtividade de colmos (SOUZA *et al.*, 2015, SÁ *et al.*, 2016).

A cultura avaliada foi cana-de-açúcar da variedade RB 98 5476. A análise do sistema radicular foi realizada pelo método do perfil com imagens digitais, conforme metodologia descrita por Vasconcelos *et al.* (2003). Para isso, foram abertas trincheiras com auxílio de retroescavadeira, atingindo aproximadamente 1,5 m de profundidade, 2 m de largura e 3 m de comprimento.

O perfil escolhido para avaliação foi transversal à linha de cultivo, e as raízes foram analisadas até 1 m de profundidade. Para exposição das raízes, utilizou-se escarificador manual, em seguida, aplicou-se tinta spray branco fosco de secagem rápida para aumentar o contraste entre raízes e solo. Após 15 minutos da aplicação da tinta, o perfil foi lavado com bomba costal equipada com ponta do tipo leque de alta pressão.

No 3º corte, foram avaliados dois perfis por trincheira, totalizando quatro trincheiras: duas em ambiente irrigado e duas em ambiente de sequeiro. A área irrigada, correspondente aos talhões 71 e 73, recebeu adubação denominada SUPER. No sequeiro, os talhões 92 e 97 receberam adubações NORMAL e SUPER, totalizando oito perfis analisados.

No 4º corte, a metodologia foi mantida, com avaliação de seis perfis. O perfil da linha do talhão 97 não foi utilizado devido à inconsistência dos dados obtidos. Para manter o balanceamento entre os manejos, uma linha do perfil irrigado também foi descartada, especificamente a linha do talhão 71.

As imagens dos perfis foram registradas, editadas e processadas no programa SAFIRA (JORGE, SILVA, 2010). O processamento permitiu exportar para planilha eletrônica os dados de fibras identificadas, volume de cada fibra, área superficial e diâmetro.

Com os dados obtidos, realizou-se o somatório do volume total e da área superficial por faixas de 20 cm de profundidade. A partir desses valores, foram calculadas as proporções de cada faixa em relação ao total do perfil, tanto para volume quanto para área superficial.

A profundidade efetiva do sistema radicular foi determinada pelo critério de concentração acumulada de 80% do total de raízes, conforme Bernardo *et al.* (2019). Após a definição da profundidade efetiva em cada corte, os valores dos parâmetros avaliados no 3º corte foram comparados aos do 4º corte, com o objetivo de analisar o comportamento radicular ao longo do tempo.

A capacidade de água disponível no solo (CAD) foi calculada pela expressão $CAD = (CC - PMP) \times PESR$, em que CC corresponde à umidade na capacidade de campo, PMP à umidade no ponto de murcha permanente e PESR à profundidade efetiva do sistema radicular. Esse critério relaciona o armazenamento de água do solo ao volume efetivamente explorado pelas raízes e é utilizado no dimensionamento e no manejo da lâmina de irrigação (ALLEN *et al.*, 1998, BERNARDO *et al.*, 2019). No manejo operacional da área irrigada, adotou-se PESR de 60 cm, disponibilidade de 1 mm/cm e coeficiente de esgotamento $f = 50\%$. Esse valor operacional foi posteriormente confrontado com a profundidade efetiva estimada neste estudo.

A análise dos resultados foi conduzida com o objetivo de compreender a distribuição e o desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar sob diferentes condições de manejo hídrico. Para isso, foram avaliadas a área superficial das raízes, o volume radicular, o diâmetro das raízes e o número de fibras presentes no perfil do solo. Os dados foram agrupados em dois manejos: cana-de-açúcar irrigada e cana-de-açúcar em condição de sequeiro. No caso do sequeiro, considerou-se a média aritmética das áreas com adubação normal e adubação super, sendo a adubação super equivalente àquela adotada na área irrigada.

Também foram considerados os atributos químicos do solo apresentados na Tabela 1, especialmente pH, P-resina, H^+Al e alumínio trocável, pois esses dados ajudam a interpretar as diferenças radiculares observadas entre os manejos irrigado e de sequeiro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

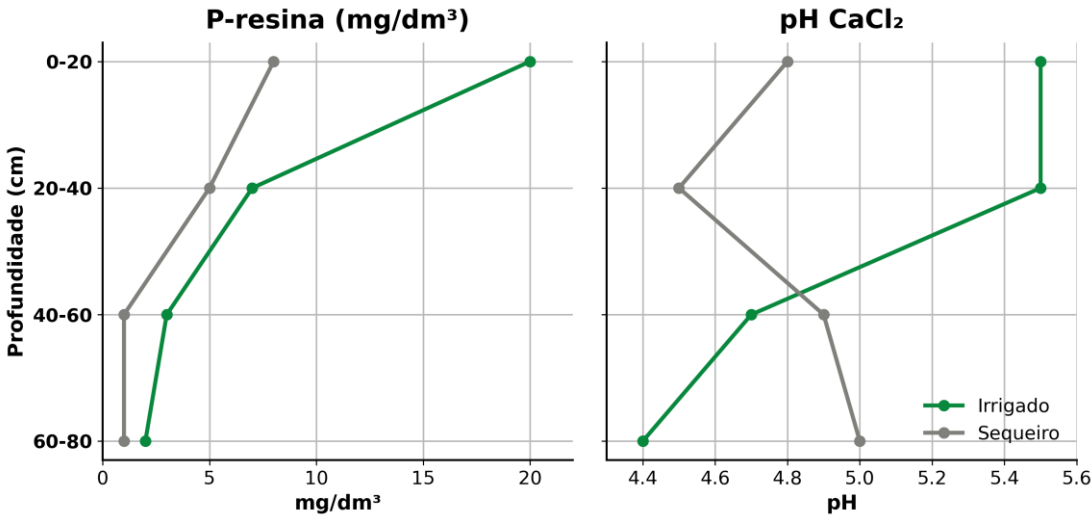
Tabela 1 - Análise química do solo

Prof (cm)	P-Resina (mg/d m³)	MO (g/dm ³)	pH CaC l₂	K (mmolc/d m³)	Ca (mmolc/d m³)	Mg (mmolc/d m³)	H+Al (mmolc/d m³)	Al (mmolc/d m³)	SB (mmolc/d m³)	CTC (mmolc/d m³)	V %	Ca/CT %	Mg/CT %	m %
Irrigado														
0-20	20	12	5.5	2.4	18	8	15	0	28.4	43.4	65	41	18	0
20-40	7	10	5.5	2.9	16	7	15	0	25.9	40.9	63	39	17	0
40-60	3	10	4.7	2.7	13	7	20	4	22.7	42.7	53	30	16	15
60-80	2	9	4.4	1.6	12	7	25	8	20.6	45.6	45	26	15	28
Sequeiro														
0-20	8	15	4.8	5.5	11	10	20	1	26.5	46.5	57	24	22	4
20-40	5	11	4.5	3.0	9	6	20	3	18.0	38.0	47	24	16	14
40-60	1	9	4.9	1.8	11	6	15	1	18.8	33.8	56	33	18	5
60-80	1	9	5.0	1.2	10	4	13	1	15.2	28.2	54	35	14	6

Fonte: Elaborado pelo autor.
Nota: P-Resina = fósforo extraído por resina, MO = matéria orgânica, H+Al = acidez potencial, SB = soma de bases, CTC = troca catiônica, V% = saturação por bases, m% = saturação por Al.

A análise química do solo apresentada na Tabela 1 foi usada para interpretar a distribuição do sistema radicular em relação à fertilidade ao longo do perfil. No manejo irrigado, o pH em CaCl₂ foi de 5,5 nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, mas reduziu para 4,7 em 40-60 cm e 4,4 em 60-80 cm. No sequeiro, os valores variaram de 4,5 a 5,0, indicando ambiente ácido em todo o perfil. A acidez foi analisada junto com a saturação por bases, a CTC e a presença de alumínio trocável, atributos usados para orientar a correção e a adubação em solos agrícolas (RAIJ *et al.*, 1997, ALBUQUERQUE *et al.*, 2024). Os dados de P-Resina e pH podem ser observados na Figura 2.

Figura 2 - Teor de P-resina e pH em profundidade nas áreas irrigada e de sequeiro



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os teores de fósforo extraído por resina diminuíram acentuadamente com a profundidade. Na área irrigada, o fósforo passou de 20 mg/dm³ na camada de 0-20 cm para 7 mg/dm³ em 20-40 cm, 3 mg/dm³ em 40-60 cm e 2 mg/dm³ em 60-80 cm. No sequeiro, os valores foram ainda menores, reduzindo de 8 mg/dm³ na superfície para 1 mg/dm³ nas camadas de 40-60 e 60-80 cm. Essa queda ajuda a explicar a concentração das raízes nas primeiras camadas, pois o fósforo tem baixa mobilidade no solo e pode ser adsorvido ou precipitado em ambientes ácidos e ricos em óxidos de ferro e alumínio. Para a cana-de-açúcar, a disponibilidade desse nutriente está associada ao crescimento inicial, ao perfilhamento, à fotossíntese e ao desenvolvimento radicular (CAIONE *et al.*, 2015, CRUSCIOL *et al.*, 2020). A menor disponibilidade de fósforo nas camadas profundas reforça a interpretação de que a maior parte das raízes se concentrou até 40 cm. Mesmo com reposição de água no ciclo irrigado, a exploração abaixo dessa faixa encontrou condições químicas menos favoráveis. Em solos ácidos, parte do fósforo aplicado pode ser fixada e ficar menos disponível às plantas por reações com alumínio, ferro e minerais de argila (BATISTA *et al.*, 2018). Portanto, a baixa disponibilidade de fósforo em profundidade deve ser entendida junto com a acidez e a capacidade de retenção do solo.

A acidez potencial, expressa por H+Al, também apresentou comportamento importante. Na área irrigada, os valores aumentaram de 15 mmolc/dm³ nas duas primeiras camadas para 20 mmolc/dm³ em 40-60 cm e 25 mmolc/dm³ em 60-80 cm. Além disso, o alumínio trocável apareceu nas camadas de 40-60 e 60-80 cm, com 4 e 8 mmolc/dm³, respectivamente, elevando a saturação por alumínio para 15% e 28%. Em solos ácidos, o alumínio é um dos principais fatores químicos capazes de restringir o alongamento radicular, pois afeta diretamente a região de crescimento das raízes e reduz a capacidade da planta de explorar água e nutrientes (KOCHIAN *et al.*, 2004). Dessa forma, no manejo irrigado, a presença de alumínio e a maior acidez em profundidade podem ter contribuído para a menor expansão efetiva do sistema radicular abaixo de 40 cm.

A saturação por bases reforça essa interpretação. No irrigado, o V% foi mais alto nas camadas superficiais, com 65% em 0-20 cm e 63% em 20-40 cm, mas diminuiu para 53% em 40-60 cm e 45% em 60-80 cm. Esse decréscimo foi acompanhado pela redução da relação Ca/CTC, que passou de 41% na superfície para 26% em 60-80 cm, enquanto a relação Mg/CTC também caiu levemente em profundidade. Como cálcio e magnésio são bases importantes para a estrutura química do complexo de troca e para o crescimento radicular, a redução desses atributos em profundidade indica ambiente menos favorável ao desenvolvimento de raízes finas. Estudos em solos tropicais mostram que a melhoria do pH, do Ca, do Mg e da saturação

por bases no perfil aumenta o crescimento radicular e pode elevar a resiliência das culturas sob déficit hídrico (MORAES *et al.*, 2023).

No sequeiro, a interpretação é um pouco diferente. Embora o pH tenha sido baixo nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, os teores de alumínio trocável e a saturação por alumínio foram menores que os observados na camada mais profunda do irrigado. Essa diferença ocorreu porque, no perfil irrigado, a redução do pH em profundidade veio acompanhada de maior H+Al e presença de alumínio trocável, enquanto no sequeiro a saturação por bases variou de 47% a 57% e a relação Ca/CTC aumentou em profundidade, chegando a 35% em 60-80 cm. Esses valores sugerem que, apesar da menor disponibilidade de fósforo, a limitação química por alumínio foi menos intensa no sequeiro em parte do perfil. Isso ajuda a compreender a tendência de maior aprofundamento relativo das raízes nesse manejo, especialmente na faixa de 20-40 cm, ainda que o sistema radicular não tenha apresentado aprofundamento efetivo além dessa camada.

A matéria orgânica variou de 12 a 9 g/dm³ no irrigado e de 15 a 9 g/dm³ no sequeiro, com redução em profundidade. Na área estudada, de textura arenosa a média, esse atributo ajuda a interpretar a retenção de nutrientes, a CTC e a manutenção da fertilidade. Mesmo assim, os valores observados não impediram a queda do fósforo disponível e das bases nas camadas mais profundas. Dessa forma, a concentração superficial das raízes esteve relacionada não só ao manejo hídrico, mas também ao ambiente químico mais favorável entre 0 e 40 cm, onde houve maior disponibilidade relativa de fósforo, maior saturação por bases e menor presença de alumínio.

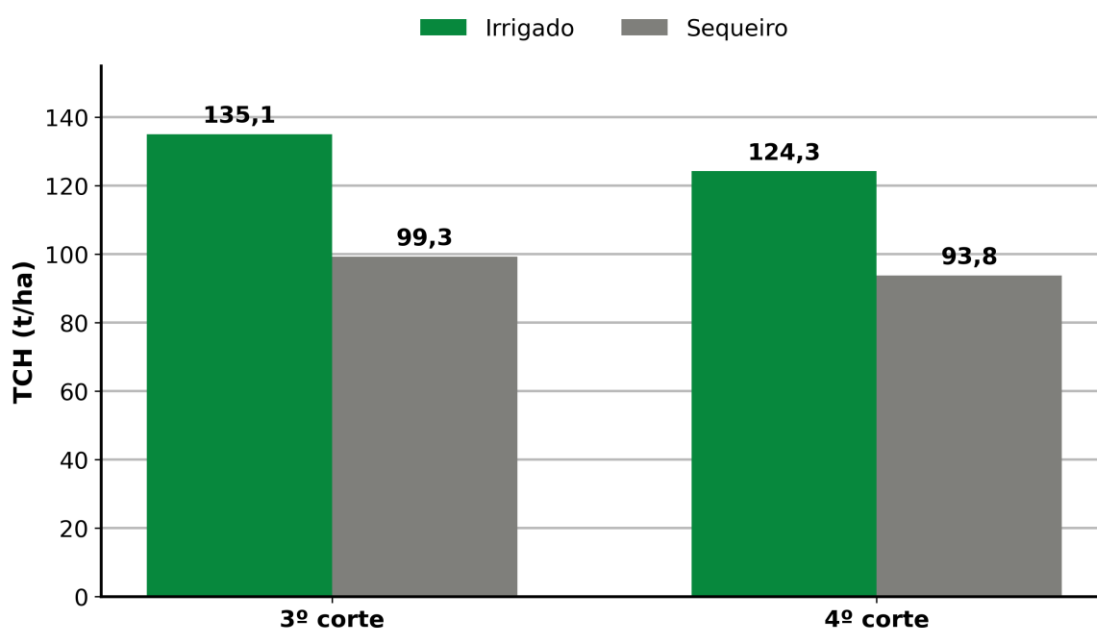
Nos dados deste trabalho, a melhoria química do solo ficou mais evidente até cerca de 40 cm, faixa que também concentrou a maior parte do sistema radicular. A correção superficial da acidez e a adubação favoreceram as camadas mais exploradas pela cultura, mas não uniformizaram o perfil. Em cana-soca, como o revolvimento do solo é limitado, a construção química em profundidade exige acompanhamento por amostragens estratificadas e estratégias de correção e fornecimento de cálcio, magnésio e nutrientes. Melhorias químicas em subsuperfície podem favorecer maior comprimento, área superficial e volume de raízes, aumentando o aproveitamento de água e nutrientes pelas culturas (RAIJ *et al.*, 1997, MORAES *et al.*, 2023).

Os dados da Tabela 1 ajudam a sustentar a profundidade efetiva de 40 cm observada no estudo. Abaixo dessa faixa, principalmente no irrigado, ocorreram redução do pH, aumento de H+Al, presença de alumínio trocável, queda do fósforo e menor saturação por bases. Essas condições indicam maior restrição à expansão radicular em profundidade. Assim, a ausência de

aprofundamento entre o 3º e o 4º corte foi interpretada como resultado conjunto da disponibilidade hídrica, dos atributos físicos e da fertilidade do solo, e não apenas como efeito direto do regime de irrigação.

A produtividade de colmos evidenciou resposta positiva ao manejo irrigado. No 3º corte, a TCH foi de 135,1 t/ha na área irrigada e de 99,3 t/ha no sequeiro, diferença de 35,8 t/ha, ou 36,1% de incremento em relação ao sequeiro. No 4º corte, a TCH foi de 124,3 t/ha na área irrigada e de 93,8 t/ha no sequeiro, diferença de 30,5 t/ha, ou 32,5% de incremento. Esses dados podem ser observados na Figura 3.

Figura 3 - Produtividade de colmos nos 3º e 4º cortes



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na sequência, os dados radiculares obtidos por meio do programa SAFIRA foram organizados separadamente para os manejos irrigado e de sequeiro, como mostram as Tabelas 2 e 3 referentes ao 3º corte.

A partir das Tabelas 2 e 3, calculou-se a participação de cada faixa de 20 cm no total de raízes analisado, além do número de fibras e da relação entre o diâmetro das raízes por faixa e o diâmetro médio das raízes. O padrão observado foi de forte concentração radicular nas camadas superficiais, comportamento também descrito por Barbosa (2016) para cana-de-açúcar.

Em relação ao volume, nota-se que a faixa de 0 a 20 cm concentrou quase 80% de todo o sistema radicular, tanto no manejo irrigado quanto no sequeiro. Portanto, essa região foi a principal responsável pela absorção de água (CRUZ *et al.*, 2005).

Tabela 2 - Atributos radiculares da área irrigada no 3º corte

Pivô Central																				
Área Superficial (mm²)						Volume (mm³)					Diâmetro das raízes (mm)					Número de Fibras				
Prof. (cm)	Q2 L1	Q2 EL1	Q4 L4	Q4 EL4	Média	Q2 L1	Q2 EL1	Q4 L4	Q4 EL4	Média	Q2 L1	Q2 EL1	Q4 L4	Q4 EL4	Média	Q2 L1	Q2 EL1	Q4 L4	Q4 EL4	Média
0-20	45384	105563	29135	73629	63428	20249	59258	10997	43927	33608	1,2	1,15	0,96	1,3	1,15	733	604	556	714	652
20-40	16020	16438	4839	3574	10218	6342	6626	1589	1424	3995	1,17	1,14	0,98	1,2	1,12	451	237	132	137	239
40-60	1487	2718	2173	231	1652	519	965	676	104	566	1,16	1,09	1,01	1,25	1,13	67	66	71	10	54
60-80	2163	2893	1728	231	1754	796	1113	551	71	633	1,21	1,13	1,11	1,11	1,14	90	73	97	12	68
80-100	4547	3143	3595	1175	3115	1762	1295	1399	496	1238	1,16	1,28	1,24	1,33	1,25	145	69	118	39	93
Total	69600	130756	41470	78840		29668	69257	15212	46023		*1,18	*1,16	*1,06	*1,24		1486	1049	974	912	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: Q2 e Q4 = quadrantes avaliados no pivô central, L = perfil na linha de cultivo, EL = perfil na entrelinha, os números após L/EL identificam os perfis, Prof. = profundidade, * = média aritmética da coluna.

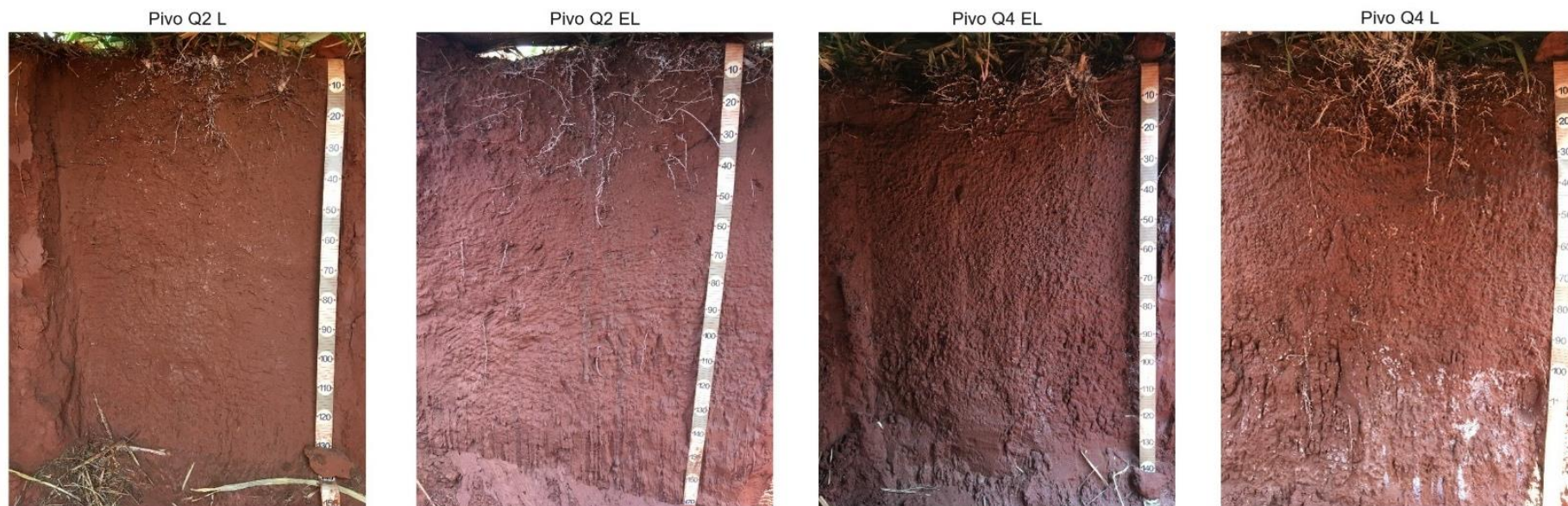
Tabela 3 - Atributos radiculares no sequeiro no 3º corte

Sequeiro																				
Área Superficial (mm²)						Volume (mm³)					Diâmetro das raízes(mm)					Número de Fibras				
Prof. (cm)	N L	N EL	S L	S EL	Média	N L	N EL	S L	S EL	Média	N L	N E	S L	S EL	Média	N L	N EL	S L	S EL	Média
0-20	213466	164110	64761	22452	116197	140398	117442	33375	11570	75696	1,12	1,04	1,14	1,25	1,14	726	524	500	193	486
20-40	62517	32053	38574	6104	34812	34450	12994	17025	1894	16591	1,19	0,96	1,06	0,93	1,04	300	448	430	172	338
40-60	7417	7202	4124	2443	5297	3087	2718	1799	907	2128	1,17	1,03	1,22	1,03	1,11	116	109	59	48	83
60-80	4329	362	339	1510	1635	1577	109	93	559	585	1,2	1,1	1,05	1	1,09	89	9	10	31	35
80-100	1371	54	143	3472	1260	449	19	39	1064	393	1,21	1,46	1,04	1,06	1,19	30	3	6	62	25
Total	289101	203782	107941	35981		179960	133283	52331	15995		*1,18	*1,12	*1,1	*1,06		1261	1093	1005	506	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: N = adubação normal, S = adubação super, L = linha de cultivo, EL = entrelinha, Prof. = profundidade, * = média aritmética da coluna.

Figura 4 - Perfis analisados na área irrigada



Fonte: Área de Hidráulica e Irrigação.

Figura 5 - Perfis analisados no sequeiro



Fonte: Área de Hidráulica e Irrigação.

Outro resultado observado foi a relação de cada faixa de profundidade com o total dos atributos radiculares avaliados, apresentada nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Percentuais por camada dos atributos radiculares na área irrigada no 3º corte

Pivô Central																
Área Superficial					Volume				Diâmetro das raízes				Número de Fibras			
Prof. (cm)	Q2 L1	Q2 EL1	Q4 L4	Q4 EL4	Q2 L1	Q2 EL1	Q4 L4	Q4 EL4	Q2 L1	Q2 EL1	Q4 L4	Q4 EL4	Q2 L1	Q2 EL1	Q4 L4	Q4 EL4
0-20	65%	81%	70%	93%	68%	86%	72%	95%	102%	99%	91%	105%	49%	58%	57%	78%
20-40	23%	13%	12%	5%	21%	10%	10%	3%	99%	98%	92%	97%	30%	23%	14%	15%
40-60	2%	2%	5%	0%	2%	1%	4%	0%	98%	94%	95%	101%	5%	6%	7%	1%
60-80	3%	2%	4%	0%	3%	2%	4%	0%	103%	97%	105%	90%	6%	7%	10%	1%
80-100	7%	2%	9%	1%	6%	2%	9%	1%	98%	110%	117%	107%	10%	7%	12%	4%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%					100%	100%	100%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: Q2 e Q4 = quadrantes avaliados no pivô central, L = perfil na linha de cultivo, EL = perfil na entrelinha, Prof. = profundidade. Nos dados de diâmetro, os percentuais representam a relação entre o diâmetro da camada e o diâmetro médio do perfil, podendo ultrapassar 100%.

Tabela 5 - Percentuais por camada dos atributos radiculares no sequeiro no 3º corte

Sequeiro																
Área Superficial					Volume				Diâmetro das raízes				Número de Fibras			
Prof. (cm)	N L	N EL	S L	S EL	N L	N EL	S L	S EL	N L	N EL	S L	S EL	N L	N EL	S L	S EL
0-20	74%	81%	60%	62%	78%	88%	64%	72%	95%	93%	104%	118%	58%	48%	50%	38%
20-40	22%	16%	36%	17%	19%	10%	33%	12%	101%	86%	96%	88%	24%	41%	43%	34%
40-60	3%	4%	4%	7%	2%	2%	3%	6%	99%	92%	111%	97%	9%	10%	6%	9%
60-80	1%	0%	0%	4%	1%	0%	0%	3%	102%	98%	95%	94%	7%	1%	1%	6%
80-100	0%	0%	0%	10%	0%	0%	0%	7%	103%	130%	95%	100%	2%	0%	1%	12%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%					100%	100%	100%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: Prof. = profundidade, N = adubação normal, S = adubação super, L = linha de cultivo, EL = entrelinha. Nos dados de diâmetro, os percentuais representam a relação entre o diâmetro da camada e o diâmetro médio do perfil, podendo ultrapassar 100%.

Na análise percentual, área superficial, volume e número de fibras representam a participação de cada camada no total do perfil. Para o diâmetro, entretanto, os valores indicam a relação entre o diâmetro médio da camada e o diâmetro médio do perfil, por isso, valores superiores a 100% significam diâmetro acima da média do perfil, e não participação maior que o total. Em geral, esse índice aumentou nas camadas mais profundas, resultado semelhante ao observado por Costa (2005) em duas cultivares de cana-de-açúcar, RB83 5486 e RB83 5089. O aumento do diâmetro das raízes pode estar associado à maior resistência física do solo ou a alterações morfológicas das raízes em profundidade (BENNIE, BOTHA, 1986).

Na camada superficial, o número de fibras radiculares no pivô central foi maior que no sequeiro. Esse resultado indica maior superfície de contato das raízes na região onde água e

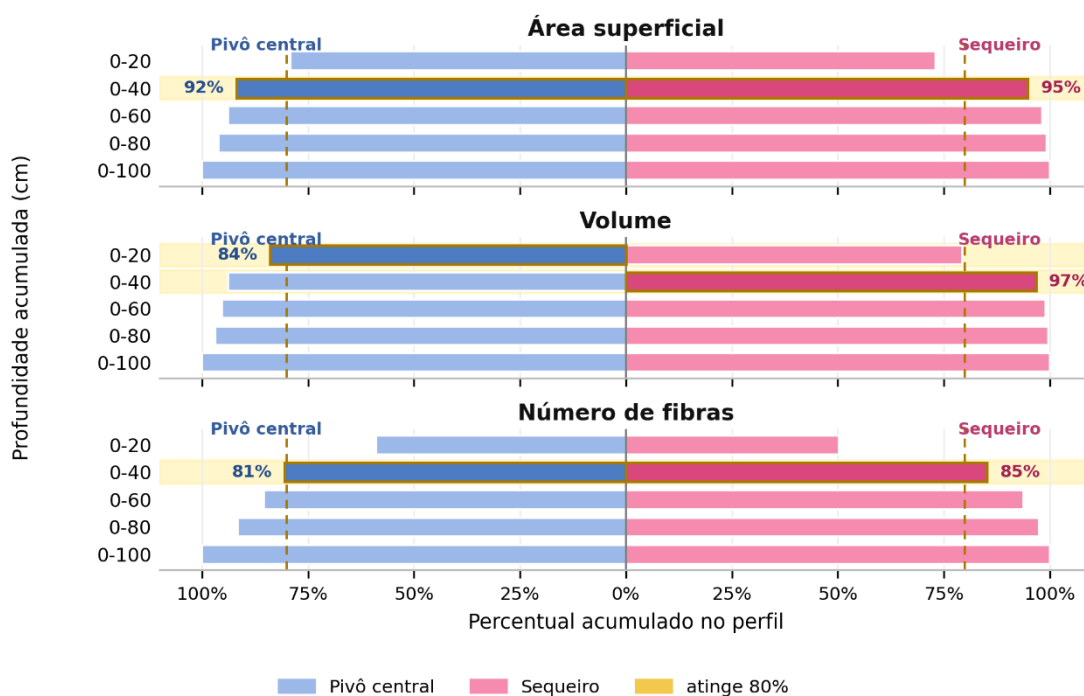
nutrientes tendem a estar mais disponíveis no manejo irrigado. Paulilo, Viana e Randi (2015) descrevem que a absorção de água e nutrientes ocorre por fluxo de massa, difusão e interceptação radicular, nos três processos, o contato entre raiz e substância absorvida é fundamental. Dessa forma, o maior número de fibras nessa camada pode favorecer a absorção na zona de maior concentração radicular.

Tabela 6 - Médias dos atributos radiculares no 3º corte

Profundidade de (cm)	Médias							
	Pivô Central				Sequeiro			
	Área Superficial (mm ²)	Volume (mm ³)	Diâmetro das raízes (mm)	Número de Fibras	Área Superficial (mm ²)	Volume (mm ³)	Diâmetro das raízes (mm)	Número de Fibras
0-20	63428	33608	1,15	652	116197	75696	1,14	486
20-40	10218	3995	1,12	239	34812	16591	1,04	338
40-60	1652	566	1,13	54	5297	2128	1,11	83
60-80	1754	633	1,14	68	1635	585	1,09	35
80-100	3115	1238	1,25	93	1260	393	1,19	25
Total	80167	40040	1,16	1105	159201	95392	1,12	966

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6 - Percentual acumulado por profundidade no 3º corte



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 6 sintetiza os percentuais acumulados do 3º corte e permite visualizar a concentração das raízes nas primeiras camadas. Na camada superficial, até 20 cm, encontrou-se 79% das raízes nos locais irrigados e 73% nos locais manejados em sequeiro. A profundidade efetiva do sistema radicular, em panorama geral, foi atingida na camada de 20 a 40 cm tanto no pivô central quanto no sequeiro. Essa interpretação se refere ao critério de 80% de raízes acumuladas e não significa ausência de raízes abaixo de 40 cm, pois raízes também foram registradas até 1 m de profundidade, porém em menor proporção.

Nos perfis sob pivô central, a profundidade efetiva concentrou-se entre 0-20 e 20-40 cm, variando conforme a posição amostrada na linha ou entrelinha. No sequeiro, a maior parte dos perfis atingiu a profundidade efetiva em 20-40 cm, com exceção do perfil Super EL, no qual o critério de 80% foi alcançado em 40-60 cm. Assim, os resultados indicam concentração superficial em ambos os manejos, mas com distribuição relativamente mais profunda no sequeiro.

Segundo Taiz *et al.* (2017), em locais com maior déficit hídrico ocorre maior desenvolvimento radicular em profundidade quando comparados a locais com maior frequência de disponibilidade de água. Esse comportamento foi observado no panorama geral dos perfis analisados, a partir das médias dos manejos irrigado e de sequeiro.

Nos dois manejos, as raízes permaneceram concentradas nas camadas superficiais, com maior intensidade no irrigado. Resultado semelhante foi relatado por Farias *et al.* (2008). No sequeiro, porém, observou-se maior participação da faixa de 20 a 40 cm, indicando distribuição um pouco mais profunda em relação ao pivô central. Essa resposta também pode estar associada ao ambiente químico do perfil e ao local de aplicação de corretivos e fertilizantes em linha/sulco, que tende a favorecer maior disponibilidade de cálcio e melhores condições de fertilidade nas camadas exploradas pelas raízes.

Para o 4º corte, foram realizadas as mesmas análises feitas para o 3º corte. Os dados iniciais do ambiente irrigado são apresentados na Tabela 6, e os dados do ambiente de sequeiro, na Tabela 7.

Tabela 7 - Atributos radiculares da área irrigada no 4º corte

Pivô Central												
Área Superficial (mm²)				Volume (mm³)			Diâmetro das raízes (mm)			Número de Fibras		
Prof. (cm)	Talhão 71 EL	Talhão 73 EL	Talhão 73 L	Talhão 71 EL	Talhão 73 EL	Talhão 73 L	Talhão 71 EL	Talhão 73 EL	Talhão 73 L	Talhão 71 EL	Talhão 73 EL	Talhão 73 L
0-20	16146	28015	56546	5379	10755	31888	1,13	1,27	1,67	253	275	323
20-40	40030	28689	34362	15649	11440	14994	1,21	1,24	1,30	375	209	290
40-60	11261	9075	1858	5299	4312	624	1,34	1,53	1,26	94	80	25
60-80	66	1336	1721	22	502	520	1,25	1,36	1,20	4	28	42
80-100	79	398	1917	28	262	557	1,43	2,08	1,14	2	3	49
Total	67583	67513	96404	26377	27269	48584	1,27	1,50	1,31	728	595	729

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: L = linha, EL = entrelinha, Prof. = profundidade.

Tabela 8 - Atributos radiculares no sequeiro no 4º corte

Sequeiro												
Área Superficial (mm²)				Volume (mm³)			Diâmetro das raízes (mm)			Número de Fibras		
Prof. (cm)	Talhão 97 EL	Talhão 92 EL	Talhão 92 L	Talhão 97 EL	Talhão 92 EL	Talhão 92 L	Talhão 97 EL	Talhão 92 EL	Talhão 92 L	Talhão 97 EL	Talhão 92 EL	Talhão 92 L
0-20	2447	4357	19768	2447	4357	19768	1,16	1,08	1,32	129	273	187
20-40	13206	4556	6737	13206	4556	6737	1,22	1,06	1,12	308	217	212
40-60	8492	355	930	8492	355	930	1,23	1,09	1,11	143	19	43
60-80	2745	13	84	2745	13	84	1,32	0,99	1,06	40	2	4
80-100	291	102	50	291	102	50	1,63	2,42	1,24	9	2	5
Total	27182	9383	27569	27182	9383	27569	1,31	1,33	1,17	629	513	451

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: L = linha, EL = entrelinha, Prof. = profundidade.

Figura 7 - Perfis do solo irrigado

Irrigado Linha T73



Irrigado Entrelinha T71



Irrigado Entrelinha T73



Fonte: Área de Hidráulica e Irrigação.

Figura 8 - Perfis do solo em sequeiro



Fonte: Área de Hidráulica e Irrigação.

Com os dados obtidos de cada perfil, montou-se uma tabela com as médias, assim como foi feito no 3º corte. Tais valores podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 9 - Médias dos atributos radiculares no 4º corte

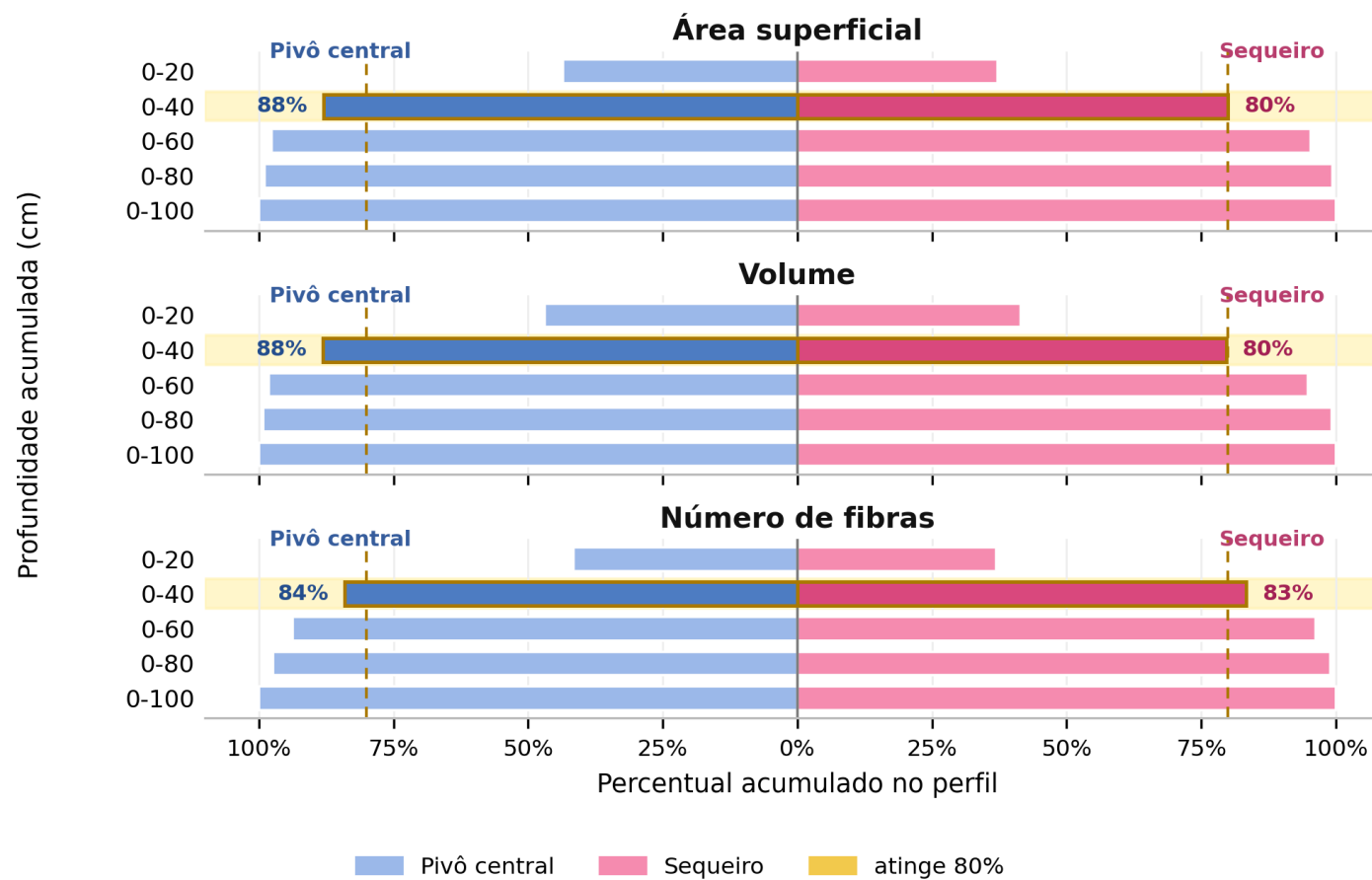
Médias								
Pivô Central					Sequeiro			
Prof. (cm)	Área Superficial (mm ²)	Volume (mm ³)	Diâmetro das raízes (mm)	Número de Fibras	Área Superficial (mm ²)	Volume (mm ³)	Diâmetro das raízes (mm)	Número de Fibras
0-20	33569	16007	1,36	284	20803	8857	1,19	196
20-40	34361	14028	1,25	291	23869	8166	1,13	246
40-60	7398	3412	1,38	66	8572	3259	1,15	68
60-80	1041	348	1,27	25	2315	947	1,12	15
80-100	798	282	1,55	18	318	148	1,76	5
Total	77166	34077	1,36	684	55876	21378	1,27	531

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: Prof. = profundidade.

A Figura 9 apresenta as médias percentuais acumuladas no 4º corte, separadas por manejo e por atributos radiculares. Assim como no 3º corte, a maior participação acumulada das raízes concentrou-se até 40 cm, indicando manutenção da PESR nessa faixa. Essa distribuição se aproxima do comportamento descrito em estudos sobre cana-de-açúcar, nos quais a maior concentração de raízes ocorre nas camadas superficiais, embora o sistema radicular possa explorar camadas mais profundas conforme as condições de solo, água e manejo (SMITH, INMAN-BAMBER, THORBURN, 2005, OTTO *et al.*, 2009).

Figura 9 - Percentual acumulado por profundidade no 4º corte



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os dados e análises concluídas entre os dois cortes, foi possível relacionar a quantidade de raízes e se houve crescimento em profundidade de um ano para outro.

Para relacionar os dados, foram calculadas as médias por linha e entrelinha de cada manejo separadamente e de cada corte, conforme apresentado na Tabela 9. No 4º corte, não foi calculada média para a linha dos manejos irrigado e de sequeiro, pois havia uma única amostra em cada local. Dessa forma, realizou-se a comparação dos valores para cada manejo e para cada parâmetro.

Tabela 10 - Dados médios do 3º e 4º cortes na área irrigada

Pivô Central																
Área Superficial (mm²)					Volume (mm³)				Diâmetro das raízes (mm)				Número de Fibras			
Prof. (cm)	L 3º Corte	EL 3º Corte	L 4º Corte	EL 4º Corte	L 3º Corte	EL 3º Corte	L 4º Corte	EL 4º Corte	L 3º Corte	EL 3º Corte	L 4º Corte	EL 4º Corte	L 3º Corte	EL 3º Corte	L 4º Corte	EL 4º Corte
0-20	37260	89596	56546	22081	15623	51593	31888	8067	1,08	1,22	1,67	1,2	645	659	323	264
20-40	10429	10006	34362	34360	3965	4025	14994	13545	1,08	1,17	1,3	1,22	292	187	290	292
40-60	1830	1474	1858	10168	598	534	624	4805	1,09	1,17	1,26	1,44	69	38	25	87
60-80	1946	1562	1721	701	673	592	520	262	1,16	1,12	1,2	1,31	94	43	42	16
80-100	4071	2159	1917	238	1581	895	557	145	1,2	1,3	1,14	1,76	132	54	49	3
Total	55535	104798	96404	67548	22440	57640	48584	26823	1,12	1,2	1,31	1,39	1230	981	729	662

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: L = linha, EL = entrelinha, Prof. = profundidade.

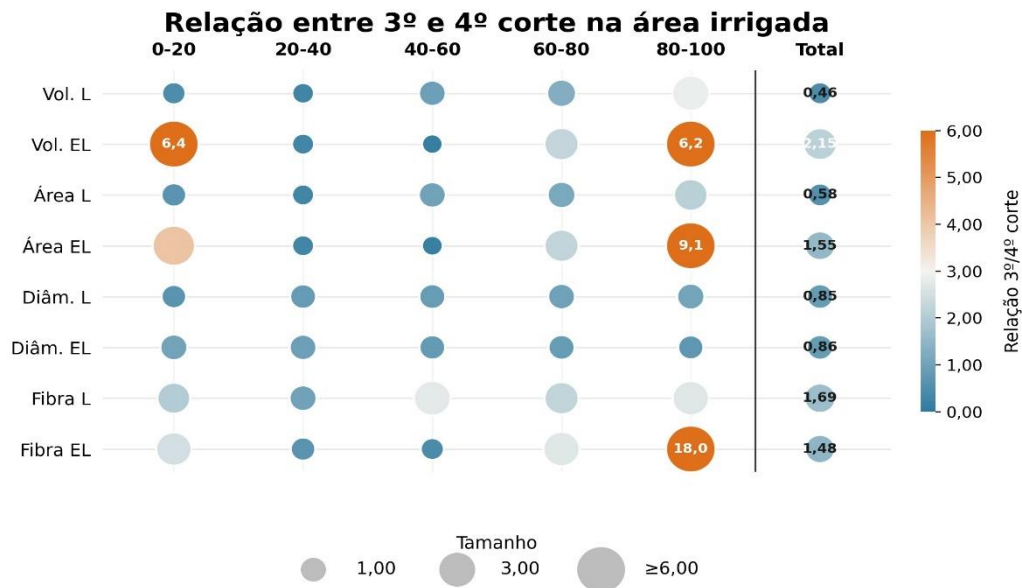
Tabela 11 - Dados médios do 3º e 4º cortes no sequeiro

Sequeiro																
Área Superficial (mm²)					Volume (mm³)				Diâmetro das raízes (mm)				Número de Fibras			
Prof. (cm)	L 3º Corte	EL 3º Corte	L 4º Corte	EL 4º Corte	L 3º Corte	EL 3º Corte	L 4º Corte	EL 4º Corte	L 3º Corte	EL 3º Corte	L 4º Corte	EL 4º Corte	L 3º Corte	EL 3º Corte	L 4º Corte	EL 4º Corte
0-20	139114	93281	19768	3402	86886	64506	19768	3402	1,13	1,15	1,32	1,12	613	358	187	201
20-40	50546	19078	6737	8881	25738	7444	6737	8881	1,12	0,95	1,12	1,14	365	310	212	262
40-60	5770	4822	930	4424	2443	1812	930	4424	1,19	1,03	1,11	1,16	88	78	43	81
60-80	2334	936	84	1379	835	334	84	1379	1,12	1,05	1,06	1,16	50	20	4	21
80-100	757	1763	50	196	244	542	50	196	1,12	1,26	1,24	2,02	18	32	5	6
Total	198521	119882	27569	18282	116146	74639	27569	18282	1,14	1,09	1,17	1,32	1133	800	451	571

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: L = linha, EL = entrelinha, Prof. = profundidade.

Figura 10 - Relação 3º/4º corte dos atributos radiculares na área irrigada

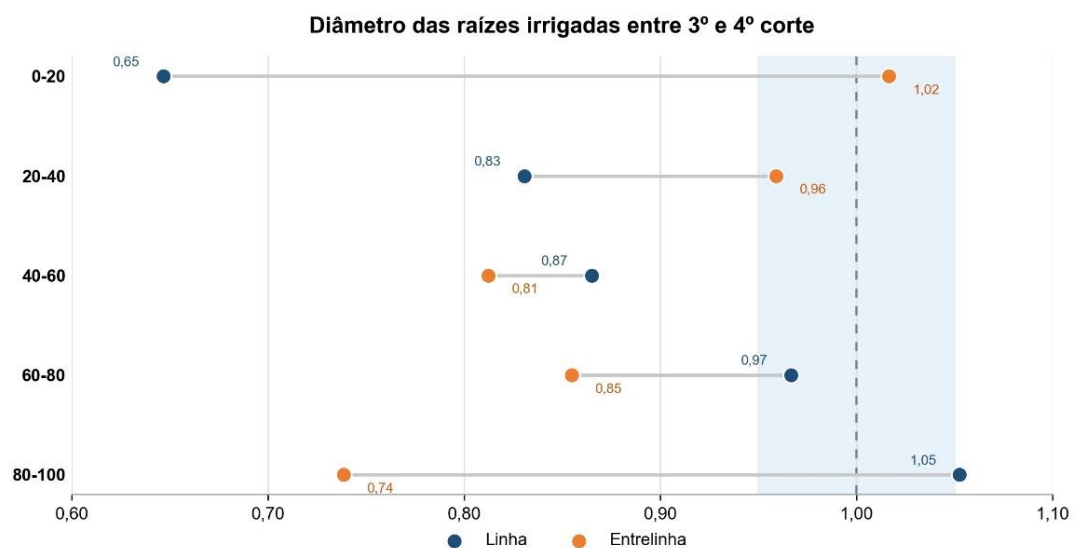


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 10, a relação 3º/4º corte compara os valores médios dos atributos radiculares na área irrigada. Valores superiores a 1,00 indicam maior expressão da variável no 3º corte, enquanto valores inferiores a 1,00 indicam maior expressão no 4º corte. Observa-se comportamento distinto entre linha e entrelinha: em linha, os totais de volume (0,46), área superficial (0,58) e diâmetro (0,85) ficaram abaixo de 1,00, sugerindo maior expressão dessas variáveis no 4º corte, na entrelinha, volume (2,15), área superficial (1,55) e número de fibras (1,48) foram superiores a 1,00, evidenciando maior participação do 3º corte. Esse padrão reforça que a evolução do sistema radicular não ocorreu de forma uniforme no perfil, mas por redistribuição entre posições de amostragem e profundidades. A elevada variabilidade espacial é esperada em avaliações radiculares de cana-de-açúcar, pois o sistema radicular apresenta forte plasticidade e distribuição influenciada pelo ambiente do solo, pelo manejo e pelo ciclo da soqueira (SMITH, INMAN-BAMBER, THORBURN, 2005, OTTO *et al.*, 2009).

A Figura 11 detalha o comportamento do diâmetro das raízes na área irrigada. Na linha, a relação 3º/4º corte permaneceu abaixo de 1,00 de 0 a 80 cm e ficou acima de 1,00 apenas na camada de 80 a 100 cm, indicando que o 4º corte apresentou diâmetros iguais ou superiores na maior parte do perfil. Na entrelinha, a relação foi próxima de 1,00 na camada de 0 a 20 cm e inferior a 1,00 nas demais camadas, indicando maior diâmetro no 4º corte em profundidade. Como o aumento do diâmetro não veio acompanhado de aumento proporcional de volume, área superficial e número de fibras em todas as posições, a interpretação mais consistente é de alteração morfológica, e não de aprofundamento efetivo do sistema radicular. Essa leitura foi feita com apoio dos atributos físicos e químicos avaliados no estudo, especialmente densidade do solo, macroporosidade, pH, P-resina e alumínio trocável, além da literatura sobre resposta radicular a condições de solo (BENNIE, BOTHA, 1986, SMITH, INMAN-BAMBER, THORBURN, 2005).

Figura 11 - Diâmetro das raízes irrigadas entre o 3º e o 4º corte

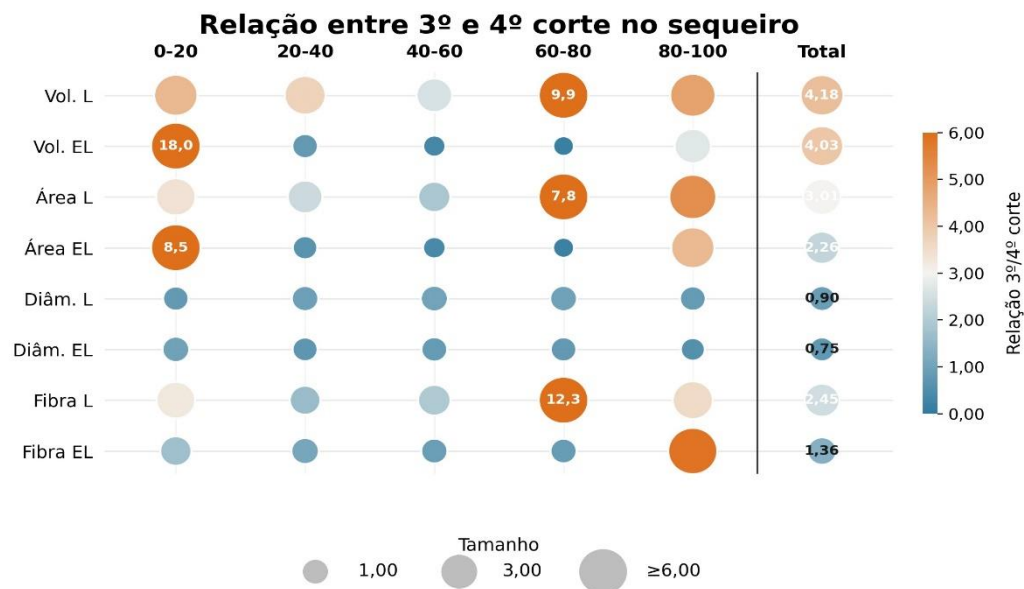


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 12, referente ao sequeiro, os totais de volume (4,18), área superficial em linha (3,01), área superficial em entrelinha (2,26) e número de fibras em linha (2,45) foram superiores a 1,00, indicando que o 3º corte apresentou maior expressão dessas variáveis que o 4º corte. Em contraste, os diâmetros ponderados ficaram abaixo de 1,00 no total (0,90 em linha e 0,75 em entrelinha), mostrando que o aumento relativo do diâmetro no 4º corte não representou maior

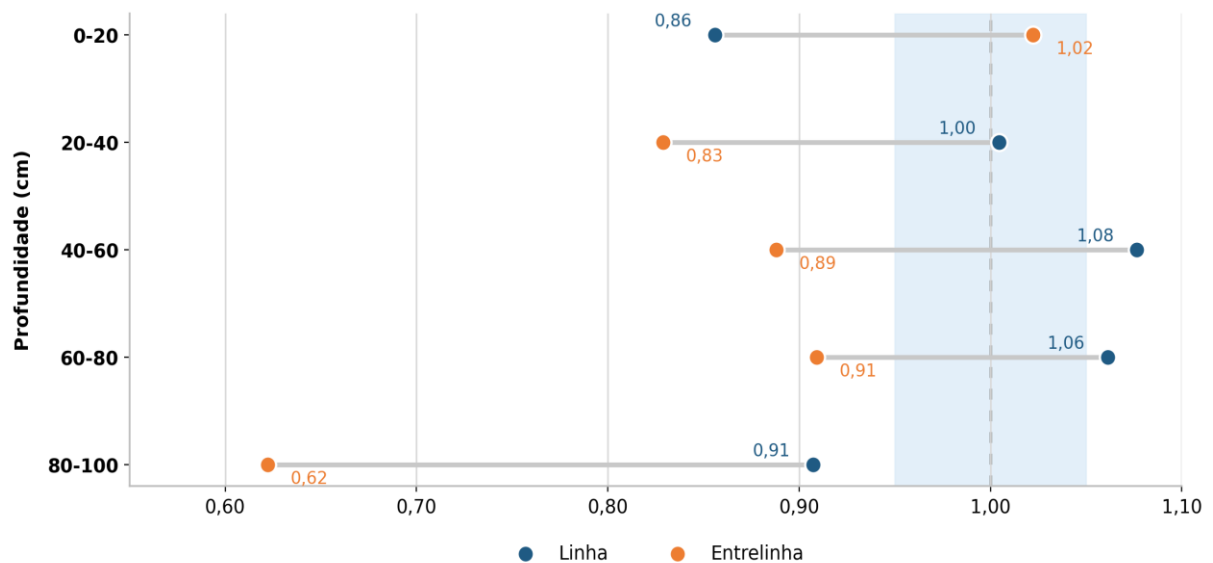
desenvolvimento radicular como um todo. Assim, no sequeiro, a redução de volume, área e fibras do 3º para o 4º corte sugere limitação ao crescimento radicular, possivelmente associada à menor disponibilidade hídrica e às condições químicas observadas na Tabela 1, sobretudo pH ácido e baixa disponibilidade de fósforo nas camadas mais profundas. A literatura indica que a maior parte das raízes da cana tende a se concentrar nas camadas superficiais, mas sua distribuição e atividade podem ser fortemente alteradas por restrições do solo e pela disponibilidade de água e nutrientes (ABICHEQUER, BOHNEN, ANGHINONI, 2003, QUAGGIO *et al.*, 1993, SMITH, INMAN-BAMBER, THORBURN, 2005, OTTO *et al.*, 2009), o que reforça a interpretação dos resultados obtidos neste estudo.

Figura 12 - Relação 3º/4º corte dos atributos radiculares no sequeiro



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 - Diâmetro das raízes no sequeiro entre o 3º e o 4º corte
Diâmetro das raízes no sequeiro entre 3º e 4º corte



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 13 apresenta a relação entre o diâmetro das raízes no 3º e no 4º corte no ambiente de sequeiro, separando as avaliações realizadas na linha e na entrelinha. Os valores próximos de 1,00 indicam maior semelhança entre os cortes, enquanto valores inferiores a 1,00 apontam menor diâmetro no 3º corte em comparação ao 4º corte. Na linha, a relação permaneceu próxima da equivalência nas camadas de 20-40, 40-60 e 60-80 cm, com valores de 1,00, 1,08 e 1,06, respectivamente, indicando variação moderada entre os cortes. Na entrelinha, porém, houve maior redução relativa, principalmente nas camadas mais profundas, com destaque para 80-100 cm, em que a relação foi de 0,62. Esse comportamento sugere maior variabilidade do diâmetro radicular no sequeiro, especialmente fora da linha de cultivo, reforçando que o aprofundamento do sistema radicular não ocorreu de forma uniforme ao longo do perfil avaliado.

5 CONCLUSÕES

A profundidade efetiva do sistema radicular da cana-de-açúcar, variedade RB 98 5476, foi de 40 centímetros tanto no manejo irrigado quanto no manejo de sequeiro, considerando o critério de concentração acumulada de 80% das raízes.

A área irrigada apresentou maior produtividade de colmos nos dois cortes avaliados. O incremento em relação ao sequeiro foi de 35,8 t/ha no 3º corte, equivalente a 36,1%, e de 30,5 t/ha no 4º corte, equivalente a 32,5%.

A maior concentração de raízes ocorreu nas camadas superficiais do solo. No manejo irrigado, a concentração foi mais expressiva na faixa de 0 a 20 cm, enquanto no sequeiro houve maior tendência de distribuição em profundidade, especialmente na faixa de 20 a 40 cm.

A comparação entre o 3º e o 4º cortes não indicou aprofundamento do sistema radicular. Esse comportamento foi associado ao conjunto de condições observadas no estudo: concentração de raízes até 40 cm, menor disponibilidade de fósforo em profundidade, acidez e presença de alumínio trocável nas camadas subsuperficiais, além dos atributos físicos avaliados.

Para fins de manejo da irrigação e cálculo da capacidade de água disponível no solo, nas circunstâncias deste trabalho recomenda-se utilizar 40 centímetros como profundidade efetiva do sistema radicular. Esse valor indica que o manejo deve priorizar irrigações mais frequentes e lâminas compatíveis com o volume de solo efetivamente explorado pelas raízes, especialmente diante da elevada demanda evapotranspirativa da região.

REFERÊNCIAS

- ABICHEQUER, A. D.; BOHNEN, H.; ANGHINONI, I. Absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo submetidas à toxidez de alumínio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 373-378, 2003.
- ALBUQUERQUE, C. G.; GAVELAKI, F.; MATERA, H. B.; MOTTA, A. C. V.; PRIOR, S. A.; ERCOLE, T. M.; ARAÚJO, E. M. Relationship between pH and base saturation associated with soil cation exchange capacity in soils of Mato Grosso do Sul, Brazil. *Bragantia*, Campinas, v. 83, e20230291, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20230291>.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- AVILEZ, A. M. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; BISPO, R. C.; GIOVANELLI, L. B. Necessidade hídrica da cana-de-açúcar no Noroeste Paulista. *Irriga*, Botucatu, v. 1, n. 1, p. 171-188, 2018. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2018v1n1p171-188>.
- BARBOSA, A. M. O sistema radicular da cana-de-açúcar. Prof. Dr. Alexandrius de Moraes Barbosa, 22 dez. 2016. Disponível em: <https://alexandriusmb.blogspot.com/2016/12/o-sistema-radicular-da-cana-de-acucar.html>. Acesso em: 21 maio 2022.
- BARBOSA, E. A. A.; ARRUDA, F. B.; PIRES, R. C. M.; SILVA, T. J. A.; SAKAI, E. Cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça via irrigação por gotejamento subsuperficial em três ciclos de cana-soca. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 17, n. 6, p. 588-594, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000600003>.
- BATISTA, M. A.; INOUE, T. T.; ESPER NETO, M.; MUNIZ, A. S. Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral. In: BRANDÃO FILHO, J. U. T.; FREITAS, P. S. L.; BERIAN, L. O. S.; GOTO, R. (org.). *Hortaliças-fruto*. Maringá: EDUEM, 2018. p. 113-162. DOI: <https://doi.org/10.7476/9786586383010.0006>.
- BENNIE, A. T. P.; BOTHA, F. J. P. Effect of deep tillage and controlled traffic on root growth, water-use efficiency and yield of irrigated maize and wheat. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 7, n. 1-2, p. 85-95, 1986. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(86\)90010-3](https://doi.org/10.1016/0167-1987(86)90010-3).
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D. Manual de irrigação. 9. ed. Viçosa, MG: UFV, 2019. 545 p.
- BISPO, R. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. C. Balanço hídrico e estimativa do consumo relativo de água da cultura da cana-de-açúcar na região Noroeste Paulista. *Irriga*, Botucatu, v. 1, n. 1, p. 94-101, 2018. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2017v1n1p94-101>.
- CAIONE, G.; PRADO, R. M.; CAMPOS, C. N. S.; MODA, L. R.; VASCONCELOS, R. L.; PIZAURU JÚNIOR, J. M. Response of sugarcane in a Red Ultisol to phosphorus rates, phosphorus sources, and filter cake. *The Scientific World Journal*, London, v. 2015, art. 405970, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/405970>.

CARVALHO, R. Cana-de-açúcar representa 80% da produção agrícola na região de Rio Preto. *Diário da Região*, São José do Rio Preto, 6 jun. 2021. Disponível em: <https://www.diariodaregiao.com.br/economia/cana-de-acucar-representa-80-da-producao-agricola-na-regiao-de-rio-preto-1.46126>. Acesso em: 18 jun. 2022.

COSTA, M. C. G. Distribuição e crescimento radicular em soqueiras de cana-de-açúcar: dois cultivares em solos com características distintas. 2005. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.11.2005.tde-09112005-150912>.

CRUSCIOL, C. A. C.; CAMPOS, M.; MARTELLO, J. M.; ALVES, C. J.; NASCIMENTO, C. A. C.; PEREIRA, J. C. R.; CANTARELLA, H. Organomineral fertilizer as source of P and K for sugarcane. *Scientific Reports*, London, v. 10, art. 5398, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62315-1>.

CRUZ, A. C. R.; LIBARDI, P. L.; CARVALHO, L. A. D.; ROCHA, G. C. Balanço de água no volume de solo explorado pelo sistema radicular de uma planta de citros. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 1-10, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000100001>.

DALRI, A. B.; CRUZ, R. L.; GARCIA, C. J. B.; DUENHAS, L. H. Irrigação por gotejamento subsuperficial na produção e qualidade de cana-de-açúcar. *Irriga, Botucatu*, v. 13, n. 1, p. 1-11, 2008. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2008v13n1p1-11>.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, Amsterdam, v. 120, n. 3-4, p. 201-214, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>.

FARIAS, C. H. A.; FERNANDES, P. D.; AZEVEDO, H. M.; DANTAS NETO, J. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 356-362, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000400004>.

FLEXAS, J.; RIBAS-CARBÓ, M.; BOTA, J.; Galmés, J.; HENKLE, M.; MARTÍNEZ-CAÑELLAS, S.; MEDRANO, H. Decreased Rubisco activity during water stress is not induced by decreased relative water content but related to conditions of low stomatal conductance and chloroplast CO₂ concentration. *New Phytologist*, Lancaster, v. 172, n. 1, p. 73-82, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01794.x>.

FORTES, C.; TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C.; OTTO, R.; FRANCO, H. C. J.; FARONI, C. E. Stalk and sucrose yield in response to nitrogen fertilization of sugarcane under reduced tillage. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 48, n. 1, p. 88-96, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013000100012>.

GAVA, G. J. C.; SILVA, M. A.; SILVA, R. C.; JERONIMO, E. M.; CRUZ, J. C. S.; KÖLLN, O. T. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 250-255, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000300005>.

JORGE, L. A. C.; SILVA, D. J. C. B. SAFIRA: manual de utilização. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2010.

KOCHIAN, L. V.; HOEKENGA, O. A.; PIÑEROS, M. A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. *Annual Review of Plant Biology*, Palo Alto, v. 55, p. 459-493, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141655>.

LEITE, J. M.; CIAMPITTI, I. A.; MARIANO, E.; VIEIRA-MEGDA, M. X.; TRIVELIN, P. C. O. Nutrient partitioning and stoichiometry in unburnt sugarcane ratoon at varying yield levels. *Frontiers in Plant Science*, Lausanne, v. 7, art. 466, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00466>.

LOPES SOBRINHO, O. P.; SILVA, G. S.; PEREIRA, A. I. S.; SOUSA, A. B.; CASTRO JÚNIOR, W. L.; SANTOS, L. N. S. A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) e o manejo da irrigação. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, Maringá, v. 12, n. 4, p. 1605-1625, 2019. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2019v12n4p1605-1625>.

MORAES, F. A.; MOREIRA, S. G.; PEIXOTO, D. S.; SILVA, J. C. R.; MACEDO, J. R.; SILVA, M. M.; SILVA, B. M.; SANCHEZ, P. A.; NUNES, M. R. Lime incorporation up to 40 cm deep increases root growth and crop yield in highly weathered tropical soils. *European Journal of Agronomy*, Amsterdam, v. 144, art. 126763, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126763>.

OLIVEIRA, D. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; BISPO, R. C.; GOMES, R. N.; TEIXEIRA, A. H. C. Estimativa da demanda de água da cultura da cana-de-açúcar irrigada utilizando sensoriamento remoto. *Irriga*, Botucatu, v. 1, n. 4, p. 678-686, 2021. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2021v1n4p678-686>.

OTTO, R.; FREITAS JÚNIOR, J. C. M.; ZAVASCHI, E.; FARIA, I. K. P.; PAIVA, L. A.; BAZANI, J. H.; MIRA, A. B.; KAMOGAWA, M. Y. Combined application of concentrated vinasse and nitrogen fertilizers in sugarcane: strategies to reduce ammonia volatilization losses. *Sugar Tech*, New Delhi, v. 19, n. 3, p. 248-257, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12355-016-0463-9>.

OTTO, R.; TRIVELIN, P. C. O.; FRANCO, H. C. J.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C. Root system distribution of sugar cane as related to nitrogen fertilization, evaluated by two methods: monolith and probes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 601-611, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000300013>.

PAULILO, M. T. S.; VIANA, A. M.; RANDI, A. M. Fisiologia vegetal. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. 182 p.

QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. van; GALLO, P. B.; MASCARENHAS, H. A. A. Respostas da soja à aplicação de calcário e gesso e lixiviação de íons no perfil do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 28, n. 3, p. 375-383, 1993.

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

REYNOLDS, W. D.; BOWMAN, B. T.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, Amsterdam, v. 110, n. 1-2, p. 131-146, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00228-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00228-8).

SÁ, M. A. C. de; SANTOS JUNIOR, J. D. G. dos; FRANZ, C. A. B.; REIN, T. A. Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de plantio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 51, n. 9, p. 1610-1622, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900061>.

SANTOS, G. O.; HERNANDEZ, F. B. T.; ROSSETTI, J. C. Balanço hídrico como ferramenta ao planejamento agropecuário para a região de Marinópolis, Noroeste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, Fortaleza, v. 4, n. 3, p. 142-149, 2010.

SILVA-OLAYA, A. M.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Comparação de métodos de amostragem para avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar. *Revista de Ciencias Agrícolas*, Pasto, v. 34, n. 1, p. 7-16, 2017. DOI: <https://doi.org/10.22267/rcia.173401.59>.

SMITH, D. M.; INMAN-BAMBER, N. G.; THORBURN, P. J. Growth and function of the sugarcane root system. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 92, n. 2-3, p. 169-183, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.017>.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; COOPER, M.; TORMENA, C. A. Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 72, n. 3, p. 270-277, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0078>.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

VASCONCELOS, A. C. M.; CASAGRANDE, A. A.; PERECIN, D.; JORGE, L. A. C.; LANDELL, M. G. A. Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar por diferentes métodos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 849-858, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000500009>.