

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE MESTRADO

**FAIXAS DE POTENCIAL MATRICIAL PARA O MANEJO DA IRRIGAÇÃO NA
CULTURA DA BETERRABA MARAVILHA**

Luma Santos Sena

CRUZ DAS ALMAS – BA
2025

FAIXAS DE POTENCIAL MATRICIAL PARA O MANEJO DA IRRIGAÇÃO NA CULTURA DA BETERRABA MARAVILHA

Luma Santos Sena

Engenheira Agrônoma

Faculdade Irecê, 2022

Dissertação apresentada ao Colegiado do Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola (Agricultura Irrigada e Recursos Hídricos).

Orientador: Prof. Dr. Alisson Jadavi Pereira da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Francisco Airdesson Lima do Nascimento

CRUZ DAS ALMAS – BA
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

S474f	Sena, Luma Santos. Faixas de potencial matricial para o manejo da irrigação na cultura da beterraba maravilha./ Sena, Luma Santos._ Cruz das Almas, Bahia, 2025. 70f.; il. Orientador: Prof. Dr. Alisson Jadavi Pereira da Silva Co-orientador: Prof. Dr. Francisco Airdesson Lima do Nascimento Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrária, Ambientais e Biológicas, Mestre em Engenharia Agrícola. 1.Irrigação - Beterraba 2. Umidade do Solo 3. Cultivo da Beterraba I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. II.Título. CDD: 631.587
-------	---

Ficha elaborada pela Biblioteca Central - UFRB.
Responsável pela Elaboração - Neubler Nilo Ribeiro da Cunha (*Bibliotecário - CRB5/1578*)
(os dados para catalogação foram enviados pelo usuário via formulário eletrônico)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE MESTRADO

**FAIXAS DE POTENCIAL MATRICIAL PARA O MANEJO DA IRRIGAÇÃO NA
CULTURA DA BETERRABA MARAVILHA**

Comissão Examinadora da Defesa de Dissertação de
Luma Santos Sena

Aprovada em: 09 de Julho de 2025

Prof. Dr. Francisco Airdesson Lima do Nascimento
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB)

Dr. Lenilson Wisner Ferreira Lima
Embrapa Mandioca e Fruticultura (EMBRAPA)

Prof. Dr. Lúcio Aderito dos Anjos Veimrober Júnior
Instituto Federal da Bahia (IFBA)

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais Francisco Paulo Dourado de Sena e Elizabete Bispo dos Santos, ao meu irmão Lucas Santos Sena, a minha avó Maria José, e aos meus avós in memória.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que mesmo nos momentos de angústia e dificuldades sempre foi minha base, meu amparo e refúgio, me dando forças para vencer cada etapa dessa jornada.

À Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, em especial à Coordenação de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade da realização deste curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da bolsa de estudos.

Ao meu pai Francisco Paulo e minha mãe Elizabete, minha mãe por ser minha amiga confiante, obrigado por todo amor, carinho, confiança, dedicação e fé que sempre tiveram comigo, por tudo que sempre abdicaram enquanto priorizavam minha educação. Tenho orgulho dos pais que Deus me deu, serei eternamente grata, e orgulhosa, da minha origem e trajetória, tudo isso me fez crer no impossível, me ensinar a crer e lutar pela realização dos meus sonhos.

Ao orientador, Prof. Dr. Alisson Jadavi Pereira da Silva, pela sua colaboração e orientação para realização desse trabalho e durante o curso de mestrado.

Ao coorientador, Prof. Dr. Francisco Airdesson Lima do Nascimento, pelos ensinamentos, dedicação, paciência, amizade, orientação e disposição durante todo o mestrado.

A todos os meus amigos e colegas do programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFRB em especial a Daniel, Maiane, Tainan, Iumi, Valdenice, Itamar, Lahiri, Marcos, Danilo e Geovana.

Aos estagiários que auxiliaram no desenvolvimento da pesquisa: José Andrey e Paulo Rafael.

A todos os professores pertencentes ao corpo docente da Pós-graduação em Engenharia Agrícola da UFRB pelos ensinamentos.

Aos colaboradores responsáveis pela infraestrutura e dependências do NEAS Dona Rita, Edilson e Sandoval por tornar nossa trajetória mais leve para realização da pesquisa durante o mestrado.

Aos examinadores por se disporem a contribuir com a melhoria deste trabalho.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	20
REVISÃO DE LITERATURA CULTIVO DE BETERRADA MARAVILHA	20
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	10
1. HIPÓTESE PRINCIPAL	12
2.1 Hipóteses secundárias.....	12
2.2 Objetivo geral	13
2.3 Objetivos específicos.....	13
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	13
3.1. Introdução à cultura da beterraba	13
3.2. Importância econômica e qualidade da beterraba de mesa.....	15
3.3. Abordagens para o manejo da irrigação	16
3.4. Manejo da irrigação via solo	18
3.5. Efeitos do déficit hídrico nas plantas e implicações para o manejo	20
3.6. Cultivo protegido.....	21
3.7 Eficiência e produtividade da água.....	22
4. Referências.....	24
CAPÍTULO II.....	30
1. INTRODUÇÃO	33
2. METODOLOGIA	34
2.1 Local de condução do experimento	34
2.2 Caracterização do solo e preparo das unidades experimentais.....	35
2.3 Instalação da cultura e condições iniciais.....	36
2.4 Determinação das propriedades hidráulicas do solo.....	37
2.5 Construção e calibração das sondas de TDR.....	38
2.6 Distribuição do sistema de irrigação e manejo da irrigação.....	38
2.7 Delineamento experimental.....	41
2.8 Avaliação das variáveis agrônômicas, fisiológicas e qualitativas	42
2.9 Análise estatística	44

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4. Conclusão.....	66
5. REFERÊNCIAS	67
CONSIDERAÇÕES FINAIS	70

CAPÍTULO I
REVISÃO DE LITERATURA CULTIVO DE BETERRADA MARAVILHA

1. INTRODUÇÃO GERAL

A beterraba (*Beta vulgaris* L.) é uma hortaliça de cultivo e consumo global, em pequena escala, reconhecida por seu alto valor nutricional, em particular pela presença de compostos como betalaínas (pigmentos antioxidantes) e folatos (CLIFFORD et al., 2015), também por sua relevância econômica. A concentração da produção nas regiões Sul e Sudeste do Brasil (São Paulo, Paraná, Minas Gerais e Santa Catarina, 76,5% do total nacional, IBGE, 2017) está relacionada ao clima favorável dessas áreas, com temperaturas ideais variando entre 15 °C e 25 °C (GONDIM, 2010).

A beterraba é uma planta típica de clima temperado, que se desenvolve melhor em temperaturas amenas a moderadas, sendo que temperaturas muito elevadas podem afetar negativamente algumas características nutricionais e sensoriais (TIVELLI et al., 2011).

No Nordeste, com ênfase na Bahia (6ª maior produtora nacional, representando 2,5% do valor de produção, segundo o IBGE, 2017) a beterraba destaca-se como alternativa para diversificação agrícola e rotação de culturas, como com feijão ou milho (GRANGEIRO et al., 2007), fortalecendo a agricultura familiar. Estudos no Submédio São Francisco demonstram seu potencial mesmo em condições semiáridas, onde a evaporação supera a precipitação, o cultivo demanda adaptações no manejo hídrico (SIMÕES et al., 2016; SILVA et al., 2019).

No Semiárido, onde temperaturas elevadas e precipitação irregular predominam (RICCE et al., 2018), as fontes hídricas são majoritariamente subterrâneas e frequentemente apresentam problemas de salinidade (HOLANDA et al., 2016). Nessas condições, a irrigação é essencial, exigindo tecnologias como irrigação localizada e cultivo protegido (MAROUELLI et al., 2011). A agricultura irrigada responde por cerca de 70% do consumo hídrico no Brasil (FRIZZONE et al., 2012; PERRY, 2011), e seu manejo eficiente é crucial para a sustentabilidade da produção agrícola, e limitação nos recursos hídricos global (DEHGHANIPOUR et al., 2020).

A beterraba é sensível à disponibilidade hídrica no solo, sendo prejudicada tanto por déficits quanto por excessos de água (GONDIM, 2010; MIRANDA & PEREIRA, 2019). Em regiões com temperaturas elevadas associadas à alta umidade relativa do ar, essas condições favorecem o desenvolvimento de doenças fúngicas e prejudicam a coloração interna das raízes, provocando o surgimento de anéis mais claros e comprometendo o aspecto comercial (TIVELLI, 2011; RICCE et al., 2018).

Para um manejo eficaz da irrigação, é essencial definir corretamente o momento, a quantidade e o método de aplicação da água, prevenindo ou mitigando o estresse hídrico. O

manejo adequado da irrigação visa fornecer a quantidade ideal de água para o desenvolvimento das plantas, maximizando a produtividade e a qualidade, enquanto minimiza o desperdício de água, a lixiviação de nutrientes e a degradação ambiental (MAROUELLI et al., 2011; COELHO et al., 2012; NOLZ et al., 2016).

No manejo da irrigação, a escolha da técnica pode variar desde o monitoramento climático, o mais difundido, até o monitoramento via solo e via planta, visando manter a umidade do solo dentro da faixa necessária para a cultura. No monitoramento da irrigação baseado em dados climáticos, a evapotranspiração da cultura é frequentemente utilizada, ajustando-se às condições atuais de cultivo por meio de um coeficiente de cultivo (Frizzone et al., 2012; Gava et al., 2016). No entanto, esses coeficientes variam conforme as condições climáticas da região, o sistema de irrigação, a densidade de plantio e a variedade cultivada, dificultando um manejo preciso em diferentes condições. A integração de tecnologias como, modelos matemáticos e sistemas de irrigação automatizados e sensores de umidade do solo, permite uma abordagem mais precisa e eficiente para a gestão da água na produção agrícola.

No manejo via solo, a quantidade de água aplicada e o momento de irrigar são determinados com base em critérios que envolvem o solo e a planta. Porém, esses critérios são muitas vezes desconhecidos ou desatualizados para culturas de menor interesse econômico, como no caso da beterraba de mesa, apresentando faixas genéricas para a maioria dos solos. Estudos demonstram que o conteúdo de água do solo deve ser mantido dentro de uma faixa ótima para o desenvolvimento da planta, sendo o potencial matricial um indicador mais preciso que métodos climáticos, essa abordagem considera a energia com que a água é retida no solo, comparado com o clima, o manejo via solo utilizando o potencial de água no solo como critério de manejo da irrigação permite um controle preciso da água disponível para as plantas (NOLZ et al., 2016; LIBARDI, 2018). Além disso, o estabelecimento de limites ótimas de umidade do solo possibilita a automação dos sistemas de irrigação, permitindo a aplicação da lâmina de água no momento correto (DOMÍNGUEZ-NIÑO et al., 2020)

Estudo com outras culturas demonstram a eficácia do manejo da irrigação baseado no potencial de água no solo. No tomateiro sob irrigação por gotejamento, MAROUELLI & SILVA (2007), observaram que tensões entre 1,5 e 3,2 mca proporcionaram máxima produtividade. Em cactáceas forrageiras, CAMPOS et al. (2021) identificaram que os valores ideais de potencial matricial foram inferiores aos tradicionalmente recomendados (abaixo da capacidade de campo), evidenciando que o manejo deve considerar as condições específicas de umidade do solo e demanda hídrica da cultura. VEIMROBER JÚNIOR et al. (2022), ao estudar

o maracujazeiro, estabeleceram como ideal a manutenção do potencial entre 0,7 e 2,0 mca, sendo 1,0 mca o valor recomendado para o manejo.

Apesar da relevância do tema, as recomendações técnicas para o manejo da irrigação via solo em beterraba de mesa ainda são escassas, sobretudo em ambientes com alta demanda evapotranspirativa, similares as condições Semiáridas. Os poucos trabalhos disponíveis, como os de Silva et al., (2015) e MIRANDA & PEREIRA (2019), foram realizados nas regiões Sul e Sudeste, onde as condições climáticas diferem significativamente das semiáridas.

Em Botucatu-SP, Silva et al. (2015) avaliaram seis níveis de tensão (1,5 a 6,5 mca) nas cultivares Early Wonder e Itapuã 202. Os resultados mostraram que a tensão de 1,5 mca proporcionou o melhor desenvolvimento das plantas, enquanto valores acima de 6,5 mca reduziram significativamente a produção e o crescimento. MIRANDA & PEREIRA (2019), em Lavras-MG, confirmaram esses achados para a cultivar Early Wonder, também observando maior produtividade e eficiência no uso da água a 1,5 mca, e ainda sugeriram que tensões até 3,5 mca podem ser utilizadas para equilibrar produtividade e conservação hídrica, desde que se mantenha a qualidade comercial das raízes.

Diante desse cenário, este estudo teve como objetivo determinar os potenciais hídricos do solo que definem os limites superiores e inferiores para o manejo da irrigação da beterraba Maravilha, cultivada em ambiente protegido. A condução do experimento visa subsidiar práticas agrícolas mais eficientes, por meio da definição de faixas de tensão que promovam maior produtividade, melhor aproveitamento da água e viabilidade econômica no cultivo.

1. HIPÓTESE PRINCIPAL

Existe uma faixa ótima de potencial matricial que, quando utilizada no manejo de irrigação via sensoramento da água no solo, maximiza a produtividade de raízes da beterraba e a eficiência hídrica do cultivo.

2.1 Hipóteses secundárias

- A adoção de valores de faixas de potencial matricial com limites inferiores ao utilizado como referência à “capacidade de campo” (-1,0 mca) podem ser adotados para a irrigação da beterraba, mantendo a produtividade de raízes, elevando a eficiência do uso da água.
- Haverá faixas de potencial matricial a ser utilizado como referência para o momento ideal de irrigar a cultura da beterraba, que previne ajuda estresse hídrico e, evita perdas produtivas e danos fisiológicos às plantas.

2.2 Objetivo geral

Determinar limites de potencial matricial para o manejo da irrigação na cultura da beterraba, visando otimizar a produtividade de raízes e aumentar a eficiência do uso da água no cultivo.

2.3 Objetivos específicos

- Indicar valores de potenciais matriciais que, quando utilizados no manejo da irrigação na cultura da beterraba maximizam a produção de raízes e elevam a eficiência do uso da água.
- Determinar qual o valor limite (valor crítico inferior) de potencial matricial, abaixo do qual ocorrem reduções significativas na produção e no desenvolvimento fisiológico na cultura da beterraba.
- Indicar a faixa ótima de potencial matricial que proporcione a melhor produção e eficiência do uso da água.
- Determinar o fator de depleção de água no solo para a cultura da beterraba, auxiliando a irrigação em diferentes tipos de solo, tanto para manejo quanto para projetos de irrigação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Introdução à cultura da beterraba

A beterraba (*Beta vulgaris* L.), pertencente à família Chenopodiaceae, é uma hortaliça versátil, cultivada principalmente em regiões de clima temperado e subtropical. Originária da região mediterrânea e do Norte da África, há uma diversidade de cultivares, que adapta-se a diferentes condições edafoclimáticas (RESENDE; CORDEIRO, 2007).

Do ponto de vista nutricional, trata-se de um alimento funcional, rico em compostos bioativos como betalaínas, antocianinas, nitratos, vitaminas A, C e do complexo B, além de minerais essenciais. Estudos com beterraba de mesa evidenciam benefícios à saúde, como melhora da função cardiovascular, regulação da pressão arterial e aumento do desempenho físico (CLIFFORD et al., 2015; HE et al., 2022).

São reconhecidas variedades da espécie *Beta vulgaris*, dentre as quais destacam-se: a sacarina (var. *altissima*), voltada à produção de açúcar; a forrageira (var. *crassa*), destinada à alimentação animal; e a de mesa (var. *esculenta*), cultivada para o consumo in natura ou minimamente processado (TIVELLI et al., 2011). No Brasil, predomina o cultivo da variedade

de mesa, com destaque para a cultivar Maravilha, do grupo Wonder, de ciclo curto (de até 80 dias), elevada produtividade e padrão comercial atrativo.

A cultura da beterraba requer temperaturas moderadas (entre 15 °C e 25 °C), solos bem drenados, com pH entre 6,0 e 7,0 e elevado teor de matéria orgânica, é uma planta considerada bienal, necessita de temperaturas abaixo de 10°C, por no mínimo de 15 dias para que deixe de ser que passe da fase de produção (estrutura de reserva), para vase reprodutiva emita haste floral e produza sementes (GONDIM, 2010; TIVELLI et al., 2011; PUIATTI; FINGER, 2019).

Pode ser cultivada durante o ano inteiro desde que haja condições ideais para o seu desenvolvimento, no Brasil o cultivo nas regiões sul e sudeste pode ser realizado durante todo o ano em regiões frias e sem fortes geadas, já em regiões de elevadas temperaturas o cultivo é indicado no outono inverno (PUIATTI; FINGER, 2019). Algumas estratégias que podem ser adotadas para seu melhor desenvolvimento da beterraba sob altas temperaturas, como escolha de cultivares mais adaptada, e adoção de estratégias para mitigar as altas temperaturas, como a irrigação que ajuda a equilibrar a temperatura de dossel para mitigar as altas temperaturas, porém sensibilidade a variações hídricas exige manejo de irrigação preciso (STAGNARI et al., 2014; SUMINARTI; DEWI; FAJRIN, 2020), especialmente em regiões com irregularidade pluviométrica.

O manejo da irrigação na cultura da beterraba pode ser abordado por diferentes metodologias, cada uma com suas vantagens, como praticidade ou precisão, e limitações. Por um lado, os métodos climáticos, baseados em estações meteorológicas e tanques de evaporação, estimam as necessidades hídricas através do cálculo da evapotranspiração da cultura (ET_c), conforme estabelecido pela FAO (ALLAN et al., 1998). Por outro lado, os métodos baseados no solo monitoram diretamente a umidade na zona radicular através de sensores capacitivos e tensiômetros, que fornecem dados precisos sobre o potencial matricial da água no solo (MAROUELLI, 2008; NOLZ et al., 2016).

No contexto do Semiárido nordestino, onde a irrigação é fator determinante para o sucesso da cultura, pesquisas como a de SIMÕES et al. (2016) em Petrolina-PE revelaram que lâminas de irrigação equivalentes a 125% da ET_c resultaram em maior produtividade do que as tradicionalmente recomendadas (100% da ET_c), evidenciando que o manejo convencional pode ser insuficiente sob altas demandas evaporativas. Paralelamente, estudos realizados no Sudeste brasileiro com as cultivares Early Wonder e Itapuã 202 comprovaram a eficácia do manejo por tensão de água no solo, com tensões entre 1,5 e 3,5 mca mostrando-se ideais para evitar tanto o déficit quanto o excesso hídrico (SILVA et al., 2015; MIRANDA & PEREIRA, 2019).

3.2. Importância econômica e qualidade da beterraba de mesa

A beterraba representa um importante componente do agronegócio de hortaliças no Brasil, embora em escala comercial inferior à de culturas como batata, tomate e cenoura. Diferentemente dessas hortaliças, que apresentam significativas oscilações de preço ao longo do ano, o mercado da beterraba mantém relativa estabilidade de preços. No Espírito Santo, em 2024, a produção registrou crescimento expressivo de 545,70% - embora ainda represente pequena parcela da produção nacional de olerícolas. Esse avanço reflete o aumento da demanda por alimentos saudáveis, funcionais e com elevado apelo nutricional (GALEANO et al., 2024).

A produção de beterraba no Brasil é realizada principalmente por agricultores familiares, com destaque para as regiões Sul e Nordeste, onde o cultivo representa uma alternativa viável para a diversificação de culturas e geração de renda. Segundo dados do IBGE (2017), a produção nacional naquele ano alcançou 134.969 toneladas, com valor de produção estimado em 94,3 milhões de reais, mesmo o estado de São Paulo liderando a produção, o cultivo tem ganhado cada vez mais espaço no Nordeste, fortalecendo a economia local e ajudando a melhorar a renda dos agricultores (COSTA, 2024).

Embora a maior parte da produção esteja concentrada nas regiões Sul e Sudeste, principalmente nos estados de São Paulo – R\$ 21.868 (23,4%), Paraná – R\$ 20.403 (21,8%), Minas Gerais – R\$ 17.336 (18,6%) e Santa Catarina – R\$ 11.828 (12,7%), que juntos representam cerca de 76,5% da produção nacional segundo o Censo Agropecuário (IBGE, 2017), o cultivo da beterraba no Nordeste, também possui importância socioeconômica. A Bahia, por exemplo, ocupa a sexta posição na produção nacional, respondendo por aproximadamente 2,5% do valor de produção, o que equivale a R\$ 2.377 mil (IBGE, 2017). O cultivo configura-se como uma alternativa viável para a diversificação agrícola, a rotação de culturas (AGUIAR et al., 2021; FIKRY, GHEITH, ELTAWIL, 2021) e o fortalecimento da agricultura familiar.

Além do mercado in natura, a beterraba tem importância crescente na indústria alimentícia, nutracêutica, devido à presença de bioativos como betalaínas, fenólicos, flavonoides, ácidos ascórbicos, triterpenos, saponinas e carotenoides (DHIMAN et al., 2021). Suas raízes são utilizadas na produção de sucos, conservas e corantes naturais, e suas folhas, ricas em ferro e fibras, têm uso culinário (CLIFFORD et al., 2015).

A qualidade da beterraba de mesa é definida por parâmetros visuais, sensoriais e sanitários. Características como formato globular, coloração vermelha intensa, textura firme e ausência de defeitos são essenciais para atender aos padrões comerciais estabelecidos pelo

mercado (TIVELLI et al., 2011). Fatores agronômicos como nutrição (BARRETO et al., 2013), espaçamento (CORRÊA et al., 2014) e suplementação com silício (LIMA et al., 2024) influenciam diretamente esses atributos. O padrão comercial da beterraba é classificado em categorias como Extra, Especial e Comercial, conforme conformidade visual, sanidade e tamanho (TIVELLI et al., 2011). A padronização melhora a eficiência logística, reduz perdas e amplia o acesso a nichos de mercado, como feiras livres, redes varejistas e o setor de processamento industrial (RESENDE; CORDEIRO, 2007).

3.3. Abordagens para o manejo da irrigação

As técnicas de manejo são indispensáveis para maximizar a eficiência do uso da água na agricultura, prevenindo aplicações inadequadas (déficit ou excesso) e mitigando impactos ambientais, de forma a integrar as demandas fisiológicas das plantas com as propriedades do sistema solo-água-atmosfera, promove maior precisão na irrigação, e sustentabilidade dos recursos hídricos (TARDIEU, 2013; VAN VLIET et al., 2021).

Para atingir esses objetivos, o manejo eficiente fundamenta-se em três princípios: quanto (lâmina calculada pela ET_c , características do solo e estágio fenológico), quando (momento ótimo para evitar estresse hídrico) e como aplicar água (escolha do sistema mais eficiente). Essa abordagem combinada considera as interações dinâmicas entre planta, água e solo, que regulam tanto a produtividade agrícola quanto a conservação dos recursos hídricos (COELHO et al., 2012; BORMA et al., 2015).

O manejo da irrigação pode ser realizado por três abordagens principais: (i) monitoramento climático (baseado em condições atmosféricas), (ii) monitoramento do solo (umidade e potencial hídrico) e (iii) monitoramento fisiológico (respostas das plantas). A escolha do método mais adequado depende das características do sistema produtivo, disponibilidade de dados, condições edafoclimáticas locais e recursos financeiros do produtor. Essa estratégia pode ser aplicada de forma isolada (planta, solo ou clima) ou combinada, devendo ainda ser adaptada aos diferentes estádios fenológicos da cultura, considerando sua sensibilidade ao estresse hídrico em cada fase (MAROUELLI et al., 2011).

A abordagem climática fundamenta-se no cálculo da evapotranspiração da cultura (ET_c), derivada da evapotranspiração de referência (ET_o) e ajustada pelos coeficientes K_c (cultivo) e K_l (localização) (DOORENBOS; PRUITT, 1977; ALLEN et al., 1998; STAGNARI et al., 2014). Embora seja amplamente aplicada em campo aberto por sua praticidade no manejo de grandes áreas, essa metodologia apresenta limitações, como a dependência de dados micrometeorológicos precisos e a necessidade de calibrar os coeficientes para condições locais

específicas (MAROUELLI et al., 2011). Adicionalmente, a ET_c por si só não define o momento ideal de irrigação, exigindo informações complementares sobre a capacidade de retenção hídrica do solo para maior precisão (COELHO et al., 2012).

O momento de irrigação pode ser determinado por dois métodos principais: (i) turno de rega fixo, baseado na relação entre a lâmina real disponível (LRD) e a ET_c em cada estágio fenológico; ou (ii) balanço hídrico do solo (LIBARDI, 2018), que considera o somatório acumulado da ET_c (descontadas as precipitações) até atingir a LRD. Essa integração entre dados climáticos e características do solo permite superar as limitações do método puramente atmosférico, assegurando maior eficiência no manejo hídrico.

Na abordagem baseada no solo, sensores são empregados para monitorar a umidade ou o potencial matricial da água no solo, permitindo a aplicação de irrigação dentro de faixas ótimas entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. A curva de retenção de água (CRA) destaca-se como ferramenta essencial nesse método, pois estabelece a relação entre o teor de umidade e o potencial de retenção, auxiliando na determinação precisa do momento e volume de irrigação (LIBARDI, 2018; PESSOA & LIBARDI, 2022; NOLZ et al., 2016).

Os indicadores de manejo baseados no solo, considerados os mais eficazes para definir tanto o momento quanto a quantidade de água a aplicar, podem ser avaliados por dois parâmetros principais: (i) teor de água no solo, que quantifica a umidade disponível, e (ii) tensão da água no solo, que indica a energia requerida pelas plantas para absorver água (ALLEN et al., 1998). Essa abordagem tem sido amplamente adotada por fornecer dados diretos e confiáveis sobre as condições hídricas na zona radicular.

O manejo da irrigação via planta baseia-se na avaliação de respostas fisiológicas aos déficits hídricos, como murcha, alterações na coloração foliar, fechamento estomático e variações na temperatura foliar ou fluxo de seiva (TAIZ; ZEIGER, 2004; CHAVES et al., 2009). Contudo, esses indicadores geralmente refletem estágios avançados de estresse, o que os torna mais adequados como complemento a outros métodos do que como critério único para o manejo, pois quando detectados, parte do prejuízo produtivo já pode ter ocorrido (TAIZ et al., 2017). Entre os indicadores vegetativos, destacam-se: (i) a aparência visual da planta (mudanças na coloração e ângulo foliar), que embora de fácil observação, só se manifesta após danos fisiológicos; e (ii) o potencial hídrico foliar (Ψ_f), medido por WP4 método preciso, mas que demanda equipamento de alto custo, sendo necessário comparar Ψ_f com valores críticos pré-estabelecidos (Ψ_{fc}) para definir o momento de irrigar.

Métodos mais sofisticados incluem a medição da temperatura foliar por termômetros de infravermelho, fundamentada no princípio de que folhas sob estresse reduzem a reflexão de luz

infravermelha e elevam sua temperatura devido à menor transpiração (CHAVES et al., 2009). Essa técnica permite calcular o índice de estresse hídrico da cultura (CWSI), mas requer calibração específica para cada cultivar e condições ambientais. Apesar de seu potencial, os métodos baseados na planta são predominantemente úteis para definir o momento de irrigação, mas não a lâmina ideal, além de serem limitados pela subjetividade (no caso de avaliações visuais) ou pela complexidade operacional (no caso de medições instrumentais) (TAIZ et al., 2017). Portanto, recomenda-se seu uso combinado com métodos climáticos ou de solo para maior confiabilidade. A integração das três abordagens tem sido considerada a forma mais eficaz para garantir o uso racional da água, especialmente em sistemas com restrição hídrica ou em regiões semiáridas (LIBARDI, 2018; NOLZ et al., 2016; FERREIRA et al., 2021).

3.4. Manejo da irrigação via solo

O manejo da irrigação com base no monitoramento do solo tem se destacado como uma abordagem eficiente para garantir o fornecimento adequado de água às culturas, especialmente para espécies sensíveis como a hortaliças. Essa técnica considera o potencial matricial da água no solo, que reflete a energia com que a água é retida, sendo um indicador direto de sua disponibilidade para as plantas (LIBARDI, 2018). A utilização de instrumentos como tensiômetros e sondas TDR permite mensurar esse potencial com precisão, ajustando a irrigação conforme as exigências fisiológicas da cultura em cada fase fenológica (NOLZ et al., 2016). No caso específico da beterraba, estudos demonstram que valores de potencial matricial entre a faixa de -1,5 e -2,5 proporcionam melhores resultados agronômicos, evitando tanto o estresse hídrico quanto o excesso de água (SILVA et al., 2015; MIRANDA & PEREIRA, 2019).

A eficácia desse método de manejo está intimamente relacionada à curva de retenção de água (CRA), que varia conforme as características físicas do solo, como textura, estrutura e grau de compactação (LIBARDI, 2018; PESSOA & LIBARDI, 2022). A CRA estabelece os limites de água disponível para as plantas, definindo a capacidade de campo como limite superior e o ponto de murcha permanente como limite inferior. Essa relação é fundamental para determinar o momento ideal de irrigação e a quantidade de água necessária, otimizando o uso dos recursos hídricos. Pesquisas recentes têm reforçado os benefícios dessa abordagem, destacando ganhos significativos tanto em produtividade quanto em eficiência do uso da água (LI et al., 2019; ZHOU et al., 2023).

Os métodos de monitoramento da umidade do solo podem ser classificados em duas categorias principais: aqueles que avaliam o teor de água e os que medem o potencial matricial. O método gravimétrico, embora preciso na avaliação do teor de água no solo, apresenta

limitações práticas por requerer pelo menos 24 horas para obtenção dos resultados. Em contrapartida, tecnologias como os sensores TDR e FDR oferecem leituras imediatas da umidade do solo, sendo mais adequados para o manejo em tempo real. Para a medição do potencial matricial, os tensiômetros e o sistema Irrigas® desenvolvido pela EMBRAPA têm se mostrado particularmente eficazes, combinando precisão técnica com viabilidade econômica (MAROUELLI; CALBO; CARRIJO, 2005). Esses instrumentos são especialmente úteis para culturas como a beterraba, onde o controle preciso da umidade na zona radicular é crucial para o desenvolvimento adequado das raízes tuberosas, cultivadas em sua maioria por pequenos produtores com menor poder aquisitivo, para obtenção de aparelhos de alto custo.

A irrigação localizada, particularmente o sistema de gotejamento, complementa eficazmente o manejo via solo, pois permite a aplicação direta de água na região das raízes (MAROUELLI, 2008; TOPAK et al., 2011). Essa combinação de técnicas resulta em maior eficiência no uso da água, reduzindo perdas por evaporação e lixiviação de nutrientes. No entanto, a implementação desses métodos requer conhecimento técnico específico, desde a instalação correta dos sensores até a interpretação adequada dos dados obtidos. Os tensiômetros, por exemplo, devem ser instalados em pelo menos três pontos de uma unidade de irrigação, posicionados na metade da profundidade do sistema radicular, para fornecer informações representativas das condições hídricas vivenciadas pelas plantas (MAROUELLI, 2008).

Apesar das vantagens, o manejo da irrigação via solo apresenta desafios práticos que devem ser considerados. A diversidade natural dos solos exige calibração dos equipamentos e adaptações específicas para cada local de cultivo. Além disso, alguns métodos de alta precisão, como a moderação de nêutrons, apresentam custos elevados e exigem cuidados especiais devido ao uso de materiais radioativos, limitando sua aplicação em condições de campo.

Estratégias combinadas que integram o monitoramento do solo com dados climáticos têm se mostrado promissoras para superar algumas dessas limitações. O método que associa indicadores de umidade do solo com cálculos de evapotranspiração (ETc) permite correções mais precisas no manejo da irrigação, adaptando-se às variações climáticas e às diferentes fases de desenvolvimento da cultura. Essa abordagem integrada é particularmente valiosa para a beterraba, onde o equilíbrio hídrico é fundamental para a qualidade e produtividade final (MIRANDA & PEREIRA, 2019). O desenvolvimento contínuo de tecnologias mais acessíveis e de fácil operação tende a ampliar a adoção dessas técnicas, contribuindo para sistemas de produção mais sustentáveis e eficientes no uso da água.

3.5. Efeitos do déficit hídrico nas plantas e implicações para o manejo

A disponibilidade hídrica adequada é um dos principais fatores determinantes do desempenho agrícola, influenciando diretamente os processos fisiológicos e a produtividade das culturas. Quando submetidas a condições de déficit hídrico, devido à estiagem prolongada, manejo inadequado de irrigação ou características edafoclimáticas restritas, as plantas exibem respostas fisiológicas complexas que afetam seu desenvolvimento e produção (TAIZ & ZEIGER, 2004; LIBARDI, 2018). Essas respostas incluem mecanismos de adaptação imediata, como o fechamento estomático e o ajuste osmótico, e processos bioquímicos mais complexos, como a síntese de compostos osmoprotetores e a ativação de sistemas antioxidantes (CHAVES et al., 2009; TAIZ et al., 2017).

Apesar de sua função protetora, o fechamento estomático apresenta consequências metabólicas significativas, particularmente na redução das trocas gasosas e, consequentemente, na diminuição da taxa fotossintética (LEUFEN et al., 2013). Em situações de estresse hídrico prolongado, observa-se um comprometimento progressivo da integridade celular, caracterizado pela desorganização das membranas, inibição da síntese proteica e acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ROS), que podem levar a danos oxidativos irreversíveis nos tecidos vegetais (MOHAMMADI-AHMADMAHMOUDI et al., 2020). Essas alterações em nível molecular e celular manifestam-se macroscopicamente através de redução da área foliar, senescência precoce, abortamento de estruturas reprodutivas e, finalmente, queda acentuada na produtividade.

Estudos clássicos demonstram que o momento de ocorrência do déficit hídrico determina seus impactos na cultura da beterraba. Em experimento com beterraba sacarina, Brown et al. (1987) constataram que a seca precoce (junho-julho) provocou redução de 27,5% no rendimento de açúcar versus o tratamento irrigado, devido principalmente ao comprometimento do sistema radicular superficial e à menor interceptação luminosa. Em contraste, a seca tardia (agosto-setembro), embora tenha acelerado a senescência foliar, afetou menos a produtividade (12,5% de redução), pois o sistema radicular já estava estabelecido. Notavelmente, todos os tratamentos mantiveram eficiência similar no uso da água (0,8t de açúcar por 25mm de água aplicada), revelando a capacidade adaptativa da cultura em manter a produtividade mesmo sob estresse hídrico.

Estudos mais recentes com também com beterraba sacarina, como o de Stagnari et al. (2014), demonstram que a cultura apresenta notável plasticidade fisiológica frente ao déficit hídrico, expressa através de: (i) ajustes na alocação de biomassa; e (ii) aumento na concentração

de compostos bioativos nas raízes. Esses achados evidenciam que o manejo preciso da irrigação, fundamentado na curva de retenção de água (CRA) e no controle rigoroso das lâminas aplicadas, pode mitigar significativamente os efeitos do déficit hídrico. Já na beterraba de mesa, essas respostas adaptativas se refletem diretamente na formação e no enchimento radicular, com implicações importantes para a uniformidade e o padrão comercial das raízes.

Por outro lado, o excesso hídrico também representa uma ameaça significativa ao desenvolvimento vegetal, especialmente em sistemas radiculares como o da beterraba. A saturação do perfil do solo provoca a diminuição da difusão de oxigênio para as raízes, criando condições favoráveis ao desenvolvimento de patógenos e ao desbalanço nutricional por lixiviação de elementos essenciais (LIBARDI, 2010; HOLANDA et al., 2016). Essa condição de hipoxia radicular compromete a respiração celular e a absorção de nutrientes, resultando em redução do crescimento e, em casos extremos, na morte das plantas.

O manejo hídrico ideal deve, portanto, equilibrar cuidadosamente a prevenção tanto do déficit quanto do excesso de água, considerando três eixos fundamentais: (1) as exigências fisiológicas da cultura em suas diferentes fases fenológicas; (2) as características físico-hídricas do solo; e (3) as condições climáticas predominantes. Na beterraba, esse equilíbrio é particularmente crítico durante a fase de formação e enchimento das raízes tuberosas, quando a demanda hídrica atinge seu ápice e os efeitos do estresse são mais visíveis. A implementação de sistemas de monitoramento contínuo da umidade do solo, aliada ao conhecimento da curva de retenção de água específica para cada tipo de solo, constitui a base para um manejo hídrico preciso e eficiente.

3.6. Cultivo protegido

O cultivo protegido tem se consolidado como uma alternativa estratégica para a produção de hortaliças em regiões com elevada variabilidade climática, semelhantes às do Semiárido brasileiro. Esse sistema permite o controle parcial de fatores ambientais adversos, como radiação solar direta, ventos fortes e precipitações, proporcionando maior estabilidade no microclima do ambiente de cultivo (TIVELLI et al., 2011; TULLIO et al., 2013).

No caso da beterraba, esse ambiente favorece o desempenho fisiológico das plantas, promovendo melhor desenvolvimento vegetativo e a formação de raízes com maior padrão comercial, (TULLIO et al., 2013). Além disso, o cultivo protegido contribui para a redução da incidência de pragas, como a lagarta-rosca (*Agrotis ipsilon*), uma das principais responsáveis por danos em mudas e plantas adultas ao cortar a porção apical central. A manutenção dos níveis de umidade mais estáveis também contribui diretamente para o aumento da eficiência no

uso da água, aspecto fundamental em regiões com escassez hídrica (TIVELLI et al., 2011; AZEVEDO et al., 2025).

A combinação do cultivo protegido com sistemas de irrigação localizada (e.g. gotejamento) otimiza a eficiência do uso da água através de: (1) controle preciso da lâmina aplicada; (2) redução de perdas por evaporação; e (3) adequação às exigências fenológicas (TOPAK et al., 2011; AZEVEDO et al., 2025). Essa estratégia contribui para ganhos significativos em produtividade e qualidade das raízes.

Adicionalmente, o cultivo protegido favorece a adoção de práticas sustentáveis, como o uso de biofertilizantes, o manejo integrado de pragas e a produção orgânica. Essas práticas não apenas contribuem para a conservação dos recursos naturais, mas também agregam valor comercial ao produto final, tornando a beterraba mais atrativa a nichos de mercado diferenciados (OLIVEIRA et al., 2022; LACERDA; FIRMINO NETA, 2024).

3.7 Eficiência e produtividade da água

A crescente escassez de recursos hídricos tem intensificado o debate sobre o uso eficiente da água na agricultura, setor responsável por mais de 70% da captação hídrica mundial (FAO, 2017). Nesse contexto, eficiência refere-se à capacidade de aplicação racional da água, minimizando perdas por evaporação, percolação e deriva. Produtividade da água” e “eficiência de uso da água” são conceitos complementares, mas frequentemente confundidos: a primeira quantifica o rendimento agrícola por unidade de água consumida, enquanto a segunda avalia a aplicação racional do recurso. Ambos são ferramentas fundamentais para o manejo sustentável dos sistemas irrigados.

A produtividade da água quantifica a relação entre biomassa produzida e água consumida, devendo sua avaliação considerar fatores edafoclimáticos, fisiológicos e de manejo. Diferentes sistemas de cultivo e escalas espaciais produzem variações na produtividade hídrica, o que requer abordagens adaptadas às realidades locais (ZHUO et al., 2021). No presente estudo, avaliou-se esses conceitos em função das faixas de tensão de água no solo, visando identificar o ponto ótimo de produtividade hídrica para a beterraba Maravilha.

No nível da lavoura, estratégias de manejo na evapotranspiração da cultura (ET_c), conforme o guia FAO-56 (ALLEN et al., 1998), e sensores de umidade do solo têm mostrado ganhos de eficiência hídrica e produtividade (MAROUELLI, 2008; NOLZ et al., 2016). A irrigação localizada por gotejamento, em especial, proporciona maior uniformidade na distribuição da água e reduz a percolação profunda, recurso essencial em regiões semiáridas, onde a variabilidade climática impõe restrições ao uso hídrico.

Fisiologicamente, a plasticidade estomática, o crescimento radicular e o particionamento de assimilados, são determinantes para a eficiência do uso da água pelas plantas (TARDIEU, 2013). As respostas adaptativas ao déficit hídrico, como o fechamento estomático e acúmulo de osmólitos (por exemplo, como prolina e açúcares solúveis) contribuem para estabilizar a produtividade sob menores lâminas de água aplicada na irrigação (BLOCH; HOFFMANN; MÄRLÄNDER, 2006; CHAVES et al., 2009).

Contudo, índices distintos mensuram aspectos diferentes do manejo hídrico e não devem ser confundidos. A eficiência de irrigação (EI) refere-se à razão entre o volume de água efetivamente utilizado pela cultura (ETc) e o volume total aplicado, evidenciando perdas por percolação e evaporação. Já a eficiência de uso da água (EUA), também chamada produtividade hídrica, quantifica o rendimento agrícola (biomassa ou produto comercial) por unidade de água consumida (ETc), avaliando o uso racional do recurso. Embora tratamentos sob faixas de tensão mais negativas tenham alcançado elevados valores de EI e EUA operacionais, esses índices não refletiram proporcionalmente na produtividade da água, pois o menor volume disponível limitou o rendimento total.

A eficiência e a produtividade do uso da água dependem de múltiplos fatores, incluindo tecnologia, políticas públicas e estratégias de manejo, poder aquisitivo do produtor que devem ser integrados a um contexto regional específico. Embora melhorias sejam possíveis, elas exigem abordagens holísticas, considerando simultaneamente aspectos biofísicos (solo, clima, cultivar) e econômicos (custo da água, acesso a sistemas de irrigação). O grande desafio reside em conciliar eficiência, produtividade e sustentabilidade.

4. REFERÊNCIAS

- AGUIAR, F. R. DE; FRANÇA, A. C.; CRUZ, R. DE S.; SARDINHA, L. T.; MACHADO, C. M. M.; FERREIRA, B. DE O.; & ARAÚJO, F. H. V. **Produção e qualidade de beterrabas submetidas a diferentes manejos de adubação e efeito residual na produção de milho cultivado em sucessão.** Journal of Environmental Analysis and Progress, v. 6, n. 1, p. 060-070, 2021. DOI:10.24221/jeap.6.1.2021.3043.060-070.
- ALLAN, R. G.; PERERRA, L. S.; RAES, D.; & SMITH M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements.** FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 1998. https://www.researchgate.net/publication/235704197_Crop_evapotranspiration-Guidelines_for_computing_crop_water_requirements-FAO_Irrigation_and_drainage_paper_56.
- AZEVEDO, A.T., COELHO, R.D. & BARROS, T.H.d. **Productivity and quality of beet (Beta vulgaris L.) under different drip irrigation management methodologies.** Irrigation Science, p. 1-14, 2025. DOI:10.1007/s00271-025-01004-1.
- BARRETO, C. R.; ZANUZO, M. R.; WOBETO, C.; & DA ROSA, C. C. B. **Produtividade e Qualidade da Beterraba em Função da Aplicação de Doses e Nitrogênio.** Revista Brasileira Multidisciplinar, p.145-158, 2013. DOI:10.25061/2527-2675/ReBraM/2013.v16i1.52.
- BORMA, L.; GITIRANA JR, G.; LUIZ, G. **Interação solo-planta-atmosfera e o papel dos solos não saturados.** IJ Carvalho, G. d. Junior, SL Machado, MM Mascarenha, & FC (Org.), Solos não saturados no contexto geotécnico, p. 327-360, 2015. https://www.researchgate.net/profile/Gilson-Gitirana/publication/350158907_Interacao_solo-planta-atmosfera_e_o_papel_dos_solos_nao_saturados/links/6054079192851cd8ce4f92f6/Interacao-solo-plantaatmosfera-e-o-papel-dos-solos-nao-saturados.pdf.
- BLOCH, D.; HOFFMANN, C. M.; MÄRLÄNDER, B. **Impact of water supply on photosynthesis, water use and carbon isotope discrimination of sugar beet genotypes.** European Journal of Agronomy, v. 24, n. 3, p. 218-225, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.08.004>.
- BROWN K. F.; MESSEM, A. B.; DUNHAM, R. J.; BISCOE P. V. **Effect of drought on growth and water use of sugar beet.** The Journal of Agricultural Science , Volume 109, p. 421 – 435, 1987. DOI: 10.1017/S0021859600081636.
- CAMPOS, A, R, F.; SILVA, A, J, P.; van LIER Q, J.; NASCIMENTO, F, A, L.; FERNANDES R, D, M.; ALMEIDA J, N.; PAZ, V, P, S.. **Yield and morphology of forage cactus cultivars under drip irrigation management based on soil water matric potential thresholds.** Journal of Arid Environments, v. 193, p. 104564, 2021. DOI:10.1016/j.jaridenv.2021.104564.
- CHAVES M. M.; FLEXAS, J; PINHEIRO. C. **Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell.** Annals of Botany, v. 103, p. 551–560, 2009. DOI:10.1093/aob/mcn125.
- CLIFFORD, T; HOWATSON, G; WEST, D, J; STEVESON, E, J; **The potential benefits of red beetroot supplementation in health and disease.** Nutrients 7.4, 2801-2822, 2015. DOI:10.3390/nu7042801.

COELHO, E. F.; SILVA, A. J. P. da; MAROUELLI, W. A.; COSTA, F. da S. **Manejo da água de irrigação**. In: COELHO, E. F.; SILVA et al. (org.). **Irrigação da bananeira**. Brasília, DF: Embrapa, 2012. Cap. 4. p. 127–165. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/951586>. Acesso em: 18 ago. 2023.

CORRÊA C.V.; CARDOSO, A. I.; SOUZA, L. G.; ANTUNES W.L; MAGOLBO, L. A. **Produção de beterraba em função do espaçamento**. Horticultura Brasileira, v. 32, p. 111-114, 2014. DOI: 10.1590/S0102-05362014000100019.

COSTA R, M, C.; GRANGEIRO L, C.; LIMA R, B.; PEREIRA N, A, E.; COSTA J, P, N.; ALVES A, A. **Fertigation with copper in beet crop in a semi-arid region**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.28, p.e276908, 2024. DOI:10.1590/1807-1929/agriambi.v28n3e276908.

DEHGHANIPOUR, A, H.; SCHOUPS, G.; ZAHABIYOUN, B.; BABAZADEH, H. **Meeting agricultural and environmental water demand in endorheic irrigated river basins: A simulation-optimization approach applied to the Urmia Lake basin in Iran**. Agricultural Water Management, v. 241, p. 106353, 2020. DOI:10.1016/j.agwat.2020.106353.

DHIMAN, A.; SUHAG, R.; CHAUHAN, D.S.; THAKUR, D.; CHHIKARA, S.; PRABHAKAR, P. K. **Status of beetroot processing and processed products: Thermal and emerging technologies intervention**. Trends in Food Science & Technology, v. 114, p. 443-458, 2021. DOI:10.1016/j.tifs.2021.05.042.

DOMÍNGUEZ-NIÑO, J. M.; OLIVER-MANERA, J.; GIRONA, J.; CASADESÚS, J. **Differential irrigation scheduling by an automated algorithm of water balance tuned by capacitance-type soil moisture sensors**. Agricultural Water Management, v. 228, p. 105880, 2020. DOI:10.1016/j.agwat.2019.105880.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 144 p. (Irrigation and Drainage Paper, 24). Disponível em: <https://www.fao.org/3/s2022e/s2022e.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2024.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The future of food and agriculture: Trends and challenges**. 2017. ISBN978-92-5-109551-5. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/items/ede32306-aec4891-9fe6-7e4f2fd93143>. Acesso em: 10 ago. 2024.

FERREIRA, L. A.; TORMEN, G. P.; SILVA, S.; SILVA, S.; GONÇALVES, L. D.; CAMPOS, D. S. **Effect of irrigation depths on the productivity of beet cultivated in Alto São Francisco, Minas Gerais**. Research, Society and Development, v. 10, n. 8, 2021. DOI:10.33448/rsd-v10i8.17228.

FIKRY, I.; GHEITH, M.; & ELTAWIL A. **An integrated production-logistics-crop rotation planning model for sugar beet supply chains**. Computers & Industrial Engineering, p.157, 2021. DOI:10.1016/j.cie.2021.107300.

FRIZZONE, José Antonio. **Desempenho da microirrigação**. In: FRIZZONE, José Antonio. Microirrigação: gotejamento e microaspersão. Maringá-Paraná: Eduem - Editora da Universidade Estadual de Maringá, 2012. p.97-137.

GALEANO, E. A. V.; OLIVEIRA, M. L. P. DE; SANTANA, M. Â. Dos S.; MACEDO, I. M. **S. Boletim da Conjuntura Agropecuária Capixaba**. Incaper-Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural, ISSN: 2764-6238. v. 9, n. 2, DOI:10.54682/bcac.v9n2. <https://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/item/4851/1/Boletim-Conjuntura-Agropecuaria-v11n2-jul-dez-2024-Incaper.pdf>.

GONDIM, A. (Ed.). **Catálogo Brasileiro de Hortaliças: saiba como plantar e aproveitar 50 das espécies mais comercializadas no país**. Embrapa Hortaliças: SEBRAE, 2010. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/887213/1/Catalogohortalicas.pdf>.

GRANGEIRO, L. C.; BEZERRA NETO, F.; NEGREIROS, M. Z. de; CECÍLIO FILHO, A. B.; CALDAS, A. V. C. de; COSTA N. L. da. **Yield of sugar beet and rocket depending on planting times in sole crop and intercropping system**. Horticultura Brasileira, v. 25 (4), p. 577-581, 2007. DOI:10.1590/S0102-05362007000400016.

HASSANLI, A. M.; AHMADIRAD, S.; BEECHAM. **Evaluation of the influence of irrigation methods and water quality on sugar beet yield and water use efficiency**. Agricultural Water Management, v. 97, n. 2, p. 357-362, 2010. DOI:10.1016/j.agwat.2009.10.010.

HE, H.; ZHOU W.; LU, H.; & LIANG B. **Growth, leaf morphological and physiological adaptability of leaf beet (*Beta vulgaris* var. *cicla*) to salt stress: A soil culture experiment**. Agronomy, v. 12, n. 6, p. 1393, 2022. DOI:10.3390/agronomy12061393.

HOLANDA, J. S.; AMORIM, J. R. A.; FERREIRA Neto M.; HOLANDA, A. C.; & SÁ F, V. S. **Qualidade da água para irrigação** In: GHEYI H, R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; GOMES F, E. Manejo da salinidade na agricultura: Estudo básico e aplicados / 2.ed. Fortaleza, p.35-50, 2016. <https://ppgea.ufc.br/wp-content/uploads/2018/04/manejo-da-salinidade-na-agricultura.pdf>.

IBGE, Base de dados dos produtos: **Produção agropecuária beterraba**. 2017 Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/beterraba/br>. Acesso em: 20 de maio de 2024.

LACERDA, Y, E, R.; FIRMINO Neta, R, L, B. **Produção e qualidade de cenouras e de beterrabas com aplicação de fertilizantes orgânicos**, São Luís: Editora Pascal, p.52, 2024. DOI:10.29327/5413067.

LEUFEN, G., NOGA, G. & HUNSCHE, M. **Physiological response of sugar beet (*Beta vulgaris*) genotypes to a temporary water deficit, as evaluated with a multiparameter fluorescence sensor**. Acta Physiol Plant 35, 1763–1774, 2013. DOI:10.1007/s11738-012-1213-6.

Li, Y.; Liu, N.; Fan, H.; Su, J.; Fei, C.; Wang, K.; Ma, F.; & Kisekka, I. **Effects of deficit irrigation on photosynthesis, photosynthate allocation, and water use efficiency of sugar beet**. Agricultural Water Management, v. 223, p. 105701, 2019. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.105701.

LIBARDI, P. L. **Potenciais da Água no Solo** In: LIBARDI, P. L. Dinâmica da Água no Solo (terceira ed.), EDUSP, São Paulo, 2018, p. 129-153

LIMA, R. B. de; PAIVA, L. G. de; PEREIRA, N. A. E.; MORAIS, E. G.; SILVA, I. B. M.; GRANGEIRO, L. C.; COSTA, R. M. C.; Oliveira, R. R. T. **Agronomic performance of beetroot as a function of silicon application.** Revista Ciência Agronômica, v. 55, p. e20218643, 2024. DOI:10.5935/1806-6690.

MAROUELLI, W. A. **Tensiômetros para o controle de irrigação em hortaliças.** Embrapa Hortaliças, Brasília, Issn 1415-3033. Circular Técnica. n. 57, 2008. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/780870/4/ct57.pdf>. Acesso em: 16 julho 2024.

MAROUELLI, W. A.; CALBO, A. G.; CARRIJO, O. A. **Avaliação de sensores do tipo irrigas para o controle da irrigação em hortaliças cultivadas em substrato.** IRRIGA, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 88–95, 2005. DOI:10.15809/irriga.2005v10n1p88-95.

MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. **Water tension thresholds for processing tomatoes under drip irrigation in Central Brazil.** Irrigation Science, v. 25, n. 4, p. 411-418, 2007. DOI:10.1007/s00271-006-0056-6.

MAROUELLI, W. A.; OLIVEIRA, A. S.; COELHO, E. F.; NOGUEIRA, L. C. SOUSA, V. F. **Manejo da água de irrigação.** In: SOUSA, V. F.; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. (Ed.). Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, Cap. 5, p. 158-232. 2011. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/915574>.

MIRANDA, J. R.; PEREIRA, G. M. **Cultivo da beterraba sob diferentes tensões de água no solo.** Irriga, v. 24, n. 2, p. 220-235, 2019. DOI: 10.15809/irriga.2019v24n2p220-235.

MOHAMMADI-AHMADMAHMOUDI, E.; DEIHIMFARD, R.; NOORI, O. **Yield gap analysis simulated for sugar beet-growing areas in water-limited environments.** European Journal of Agronomy, v. 113, p. 125988, 2020. DOI:10.1016/j.eja.2019.125988.

NOLZ, R.; CEPUDER, P.; BALAS, J.; & LOISKANDL, W. **Soil water monitoring in a vineyard and assessment of unsaturated hydraulic parameters as thresholds for irrigation management.** Agricultural Water Management, v. 164, p. 235-242, 2016. DOI:10.1016/j.agwat.2015.10.030.

OLIVEIRA, N, L, C.; MELO W, M, M.; MOREIRA, R, A.; OLIVEIRA, E, L. **Desempenho de genótipos de beterraba de mesa em sistema orgânico no norte de minas gerais.** Revista Ciência Agrícola, v. 20, n. 2, p. 21-29, 2022. DOI: 10.28998/rca.v20i2.12397.

PERRY, Chris. **Accounting for water use: Terminology and implications for saving water and increasing production.** Agricultural water management, v. 98, n. 12, p. 1840-1846, 2011. DOI:10.1016/j.agwat.2010.10.002.

PESSOA, T. N.; LIBARDI, P. L. **Physical-hydric properties of Oxisols as influenced by soil structure and clay mineralogy.** Catena, v. 211, p. 106009, 2022. DOI:10.1016/j.catena.2021.106009.

PUIATTI, M.; FINGER, F. L. **Beterraba.** In: Júnior, T. J. P.; Venzon, M. (2. ed.) **101 Culturas: Manual de tecnologias agrícolas.** Belo Horizonte, MG: EPAMIG, 2019.

RESENDE, G. M.; CORDEIRO, G. G. **Uso da água salina e condicionador de solo na produtividade de beterraba e cenoura no semiárido do Submédio São Francisco**. Petrolina: EMBRAPA Semiárido, 2007. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/153238/1/COT128.pdf>.

RICCE, W. S.; PANDOLFO, C.; MARCHESI, D. R.; MASSIGNAM, A. M.; & VIANNA, L. F. N. **Análise de riscos climáticos para a cultura da beterraba no estado de Santa Catarina**. Ciram/Epagri, publicacoes-tecnico-cientificas, Relatório, 2018. https://ciram.epagri.sc.gov.br/ciram_arquivos/site/boletins_culturas/risco_climatico/SC_Beterraba.pdf.

SILVA, A. O., SILVA, Ê. F., BASSOI, L. H., & KLAR, A. E. **Desenvolvimento de cultivares de beterraba sob diferentes tensões da água no solo**. Horticultura Brasileira, v. 33, p. 12-18, 2015. DOI:10.1590/S0102-053620150000100003.

SILVA, C. B. da; SILVA, J. C. da; SANTOS, D. P. dos; SILVA, P. F. da; BARBOSA, M. de S.; SANTOS, M. A. L. dos. **Manejo da irrigação na cultura da beterraba de mesa sob condições salinas em Alagoas**. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada v.13, nº.2, p. 3285 - 3296, Fortaleza, CE, ISSN 1982-7679, 2019. DOI:10.7127/rbai.v13n200880.

SIMÕES, W. L.; SOUZA, M. A.; YURI, J. E.; GUIMARÃES, M. J. M.; GOMES, V. H. F. **Desempenho de cultivares de beterrabas submetidas a diferentes lâminas de irrigação no Submédio São Francisco**. Water Resources and Irrigation Management-WRIM, v. 5, n. 2, p. 51-57, 2016. <https://periodicos.ufpb.edu.br/index.php/wrim/article/view/1581/815>.

STAGNARI F.; GALIENI A.; SPECA S.; PISANTE M. **Water stress effects on growth, yield and quality traits of red beet**. Scientia Horticulturae, v. 165, p. 13-22, 2014. DOI:10.1016/j.scienta.2013.10.026.

SUMINARTI, N. E.; DEWI, T. N.; FAJRIN, A. N. **The combined effect of volume water supply and varieties on physiological aspects, growth, and yield of red beetroot (Beta vulgaris L.) in dryland jatikerto, indonesia**. International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology, v. 5, n. 2, 2020. DOI:10.22161/ijeab5218.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; Møller, M. I.; Murphy, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888p

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal Porto Alegre: Parte I: Transporte e Translocação de água e solutos, Parte II: Bioquímica e metabolismo, Parte III: Crescimento e Desenvolvimento**. Artmed, 3ª Edição – 2004. 720 p.

TARDIEU, F. **Plant response to environmental conditions: assessing potential production, water demand, and negative effects of water deficit**. Frontiers in Physiology, v. 4, p. 17, 2013. Doi:10.3389/fphys.2013.00017.

TIVELLI, S. W.; FACTOR, T. L.; TERAMOTO, J. R. S.; FABRI, E. G.; MORAES, A. R. A. de; TRANI, P. E.; MAY, A. **Beterraba: do plantio à comercialização**. Campinas: Instituto Agrônomo, v. 210, p. 45, 2011. 45p. (Série Tecnologia APTA. Boletim Técnico IAC, 210), ISSN: 1809-7936. Versão on-line: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/48016/1/Andre-May-Boletim-Tec-IAC.pdf>.

TOPAK, R.; SÜHERI, S.; ACAR, B. **Effect of different drip irrigation regimes on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield, quality and water use efficiency in Middle Anatolian, Turkey.** Irrigation Science, v. 29, p. 79-89, 2011. DOI:10.1007/s00271-010-0219-3.

TULLIO, J.A.; OTTO, R. F.; BOER, A.; & OHSE, S. **Cultivo de beterraba em ambientes protegido e natural na época de verão.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 17, p. 1074-1079, 2013. DOI:10.1590/S1415-43662013001000008.

VAN VLIET, M.T. H.; JONES, E. R.; FLÖRKE, M.; FRANSSEN, W. H. P.; HANASAKI N.; WADA Y.; YEARSLEY, J. R. **Global water scarcity including surface water quality and expansions of clean water technologies.** Environmental Research Letters, v. 16, n. 2, p. 024020, 2021. DOI:10.1088/1748-9326/abbfc3.

VEIMROBER JÚNIOR, L. A. A.; SILVA, A. J. P.; GHEYI, H. R.; NASCIMENTO, F. A. L.; SILVA M. G.; & VELLAME, L. M. **Water productivity of passion fruit under different forms of propagation and soil-based irrigation management criteria.** Irrigation Science, v.40, p.1-11, 2022. DOI:10.1007/s00271-021-00766-8.

ZHOU, H.; WANG, L.; XU, P.; ZHANG, L.; HUANG, R.; YANG, M.; WANG, K.; FAN, H. **Deficit irrigation combined with nitrogen application in the early growth stage of sugar beet increases the production capacity of canopy and avoids yield loss.** Journal of the Science of Food and Agriculture, v. 103, n. 15, p. 7600-7611, 2023. DOI:10.1002/jsfa.12843.

CAPÍTULO II

FAIXAS DE POTENCIAL MATRICIAL PARA O MANEJO DA IRRIGAÇÃO NA CULTURA DA BETERRABA MARAVILHA

FAIXAS DE POTENCIAL MATRICIAL PARA O MANEJO DA IRRIGAÇÃO NA CULTURA DA BETERRABA MARAVILHA

RESUMO: O manejo eficiente da irrigação é essencial para maximizar a produtividade e otimizar o uso dos recursos hídricos, especialmente em hortaliças sensíveis à disponibilidade de água no solo, como a beterraba. Neste estudo, avaliou-se o efeito de diferentes faixas de potencial matricial sobre a produtividade e a eficiência do uso da água da cultivar de beterraba Maravilha. Foram realizados três experimentos em casa de vegetação. Os experimentos foram conduzidos, sob delineamento experimental inteiramente casualizados, com cinco faixas de potencial matricial e seis repetições, totalizando 30 parcelas experimentais. Experimento 1 (-0,5 a -0,55; -1,0 a -1,19; -2,0 a -2,23; -3,0 a 3,42; e -4,0 a -4,84 mca). Experimento 2 (-1,09 a -1,57; -1,09 a -2,18; -1,09 a -2,60; -1,09 a -3,31; e -1,09 a -4,31 mca). Em ambos os experimentos, a irrigação foi realizada por gotejamento, e o monitoramento da umidade do solo foi feito com sensores TDR. Ao fim de cada ciclo de cultivo, foram realizadas análises morfológicas da parte aérea, incluindo número de folhas, altura e comprimento e largura das folhas (cm), além da área foliar por planta (cm²). Também foram realizadas análises de produtividade da beterraba, classificando os resultados em produtividade total e produtividade comercial. Além dessas análises, foram realizadas avaliações fisiológicas, incluindo a tensão de água na folha e o teor relativo de água na folha. As faixas de potencial matricial entre -0,5 a 0,55 e -1,09 a -2,18 mca, apresentam os maiores valores de área foliar, produtividade total e produtividade comercial, mantendo o solo sempre em condições de água facilmente disponível. Pensando em eficiência de uso da água e uma produtividade comercial dentro da média nacional para cultivares de beterraba a faixa de potencial de água no solo (-1,09 a -2,6 mca), é uma alternativa aos irrigantes da cultura. Dessa forma, a adoção de faixas de tensão entre -1,0 e -2,18 mca é indicada como intervalo ideal para o manejo da irrigação na cultura da beterraba Maravilha proporcionando máxima produtividade, isso proporciona um fator de depleção de 0,3520. Em condições em que se deseja permitir maior estresse para as plantas e ainda assim está dentro da média nacional o fator de depleção indicado é de 0,4140.

Palavras-chave: *Beta vulgaris* L., agricultura irrigada, manejo hídrico, variação de umidade no solo.

MATRIX POTENTIAL RANGE FOR IRRIGATION MANAGEMENT IN MARVEL BEET CROP

ABSTRACT: Efficient irrigation management is essential to maximize productivity and optimize water resource use, especially in vegetables sensitive to soil water availability, such as beets. This study evaluated the effect of different matric potential ranges on the productivity and water use efficiency of the Maravilha beet cultivar. Three experiments were conducted in a greenhouse. The experiments were conducted in a completely randomized experimental design, with five matric potential ranges and six replicates, totaling 30 experimental plots. Experiment 1 (-0.5 to -0.55; -1.0 to -1.19; -2.0 to -2.23; -3.0 to -3.42; and -4.0 to -4.84 mca). Experiment 2 (-1.09 to -1.57; -1.09 to -2.18; -1.09 to -2.60; -1.09 to -3.31; and -1.09 to -4.31 mca). In both experiments, irrigation was carried out by drip irrigation, and soil moisture was monitored with TDR sensors. At the end of each growing cycle, morphological analyses of the shoot were performed, including number of leaves, height and length and width of leaves (cm), as well as leaf area per plant (cm²). Beet yield analyses were also performed, classifying the results into total yield and commercial yield. In addition to these analyses, physiological evaluations were performed, including leaf water tension and relative leaf water content. The matric potential ranges between -0.5 to -0.55 and -1.09 to -2.18 mca present the highest values for leaf area, total yield, and commercial yield, maintaining the soil in conditions of readily available water. For water use efficiency and commercial yield within the national average for beet cultivars, the soil water potential range (-1.09 to -2.6 mca) is an alternative to irrigating the crop. Therefore, the adoption of tension ranges between -1.0 and -2.18 mca is recommended as the ideal interval for irrigation management in Maravilha beet crops. This provides maximum productivity, resulting in a depletion factor of 0.3520. Under conditions where greater plant stress is desired while still remaining within the national average, the recommended depletion factor is 0.4140.

Keywords: *Beta vulgaris* L., irrigated agriculture, water management, soil moisture variation.

1. INTRODUÇÃO

As alterações no ciclo hidrológico, caracterizadas por chuvas irregulares, espaçadas e concentradas em curtos períodos, vêm intensificando a necessidade de estratégias de irrigação que conciliem eficiência técnica e uso racional da água. Em regiões de clima semiárido, como o Nordeste brasileiro, a combinação de precipitação irregular, distribuição pluviométrica desigual e elevada demanda evaporativa (ALLAN et al., 1998) agrava o déficit hídrico, afetando diretamente o desempenho fisiológico das culturas (ZHANG et al., 2025). Nesses contextos, o manejo da irrigação com base nas exigências hídricas da cultura e nas propriedades físico-hídricas do solo torna-se indispensável para garantir estabilidade produtiva e sustentabilidade, como evidenciado em estudos com beterraba conduzidos no Submédio São Francisco (SIMÕES et al., 2016; FRIZZONE et al., 2012).

Em hortaliças de ciclo curto e elevada sensibilidade às variações de umidade no solo, como a beterraba (*Beta vulgaris* L.), o manejo adequado da irrigação é essencial para garantir o desempenho agrônomo e a qualidade comercial das raízes. Nesse contexto, destaca-se o manejo da irrigação com base em potencial matricial de água no solo, técnica que permite determinar limites superiores e inferiores para reposição hídrica ao longo do ciclo da cultura. Essa abordagem considera o solo como um reservatório dinâmico, cujas propriedades de retenção e movimentação da água variam conforme a textura e as exigências da espécie cultivada (MAROUELLI, 2008; PESSOA et al., 2022).

O manejo preciso da irrigação em regiões com limitação hídrica requer estratégias que combinem previsão climática, monitoramento do solo e automação. Embora sistemas de modelagem como o PALMS (NELSON et al., 2013) auxiliem no planejamento hídrico agrícola, sua eficácia depende da integração com dados locais como demonstrado por NOLZ et al., (2016) em vinhas e MAROUELLI (2008) em hortaliças, que destacam a importância da medição direta da umidade ou tensão da água no solo. Contudo, a implementação inadequada dessas tecnologias pode comprometer seus benefícios: FREITAS et al. (2012) observaram que sensores não calibrados levaram a aplicação excessiva de água e menor eficiência hídrica. Soluções como o algoritmo desenvolvido por DOMÍNGUEZ-NIÑO et al. (2020), que combina balanço hídrico com feedback em tempo real de sensores de capacitância, demonstraram viabilidade técnica ao fornecer doses precisas de irrigação adaptadas às condições climáticas e ao ciclo vegetativo, otimizando o uso da água em sistemas automatizados.

O manejo da irrigação deve considerar não apenas as condições climáticas locais, mas também as propriedades físico-hídricas do solo, como a curva de retenção de água e a

condutividade hidráulica, que determinam a disponibilidade hídrica para as plantas. Além disso, é crucial adaptar o manejo às exigências específicas da cultura. No caso da beterraba de mesa (*Beta vulgaris* L.), Simões et al. (2016) observaram que uma lâmina de irrigação de 125% da evapotranspiração da cultura (ETc) resultou na maior produtividade comercial. No entanto, os autores destacam que esse valor não considerou a umidade inicial do solo e, portanto, não pode ser generalizado para outras condições edafoclimáticas sem ajustes locais, pois estratégias baseadas apenas na ETc, como a testada por Simões et al. (2016), podem subestimar ou superestimar as necessidades hídricas, já que não consideram a água armazenada no solo.

Para a beterraba de mesa sob manejo da irrigação por tensão da água no solo, estudos experimentais demonstram relações claras entre o potencial hídrico e o desenvolvimento da cultura. Silva (2015) observou redução progressiva na biomassa da parte aérea e das raízes à medida que as tensões aumentaram de -1,5 mca (melhor resultado) até -6,5 mca (limite testado). Corroborando esses achados, Miranda e Pereira (2019) constataram uma relação linear decrescente entre o aumento da tensão e o diâmetro das raízes, com valores máximos de 58,51 mm (-1,5 mca) e 53,87 mm (-2,5 mca). Esses resultados conjuntos permitem concluir que: (i) tensões mais negativas que -2,5 mca comprometem o padrão comercial das raízes, e (ii) a faixa ótima para manejo situa-se próximo a -1,5 mca, parâmetros válidos para as condições edafoclimáticas do Sul e Sudeste onde os estudos foram conduzidos.

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo estabelecer os potenciais hídricos críticos (limites superior e inferior) para o manejo da irrigação da beterraba (*Beta vulgaris* L.) em condições similares as semiáridas e identificar as condições ótimas de umidade que aliem elevados rendimentos, padrão comercial das raízes e uso eficiente da água.

2. METODOLOGIA

2.1 Local de condução do experimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação no Núcleo de Engenharia de Água e Solo (NEAS), pertencente à Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), campus de Cruz das Almas. A área experimental está localizada a uma altitude média de 220 m, nas coordenadas geográficas 12°40'19" S e 39°06'23" W. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo Af (tropical úmido sem estação seca definida), com média pluviométrica anual de 1.131,17 mm, temperatura média de 24,5 °C e umidade relativa do ar em torno de 80% (GUIMARÃES et al., 2016).



Figura 1 (a) Casa de vegetação externa; **(b)** Disposição dos experimentos na área interna da casa de vegetação.

A casa de vegetação, possui estrutura de arco simples, com 3 m de pé-direito, 6 m de largura e 24 m de comprimento (Figura 1a-b). A cobertura é composta por filme plástico de 150 μm , e as laterais revestidas com sombrite de 50%, permitindo ventilação do ambiente.

2.2 Caracterização do solo e preparo das unidades experimentais

A caracterização do solo foi realizada a partir de amostras deformadas de 0-0,20 m de profundidade na área experimental. A análise física classificou o solo como Latossolo Amarelo distrocoeso, de textura franco-arenosa, composto por 67% de areia, 25% de argila e 8% de silte.

Os resultados da caracterização química (Tabela 1) indicaram a necessidade de correção da acidez. Com base no pH inicial de 4,34, realizou-se a calagem com a aplicação de 1.600 kg ha^{-1} de calcário, visando elevar a saturação por bases a 80% e atingir um pH próximo a 6,5. A adubação de fundação foi feita com 0,8 L de esterco bovino curtido e 24 g de superfosfato simples por tanque, seguindo as recomendações para a beterraba de 30 a 50 t ha^{-1} de esterco (adubação orgânica) e 80 a 160 kg ha^{-1} de N e 40 a 80 kg ha^{-1} de K_2O Tivelli et al. (2011).

Tabela 1 - Atributos químicos do solo da area experimental. Cruz das Almas-BA.

-		mg/d^3			cmolc/dm^3					
M.O %	pH	P	K	Ca+Mg	Al	H+Al	Na	S	CTC	V %
1,28	4,34	13	56	1,2	0,1	2,67	0,04	1,38	4,05	34,5

pH - potencial hidrogeniônico; P - fósforo; K - potássio; Ca+Mg - cálcio e magnésio; Al - alumínio; H - hidrogênio; Na - sódio; S - enxofre; CTC - capacidade de troca catiônica; V - saturação por bases; MO- matéria orgânica.

A fertirrigação realizada quinzenalmente, utilizando fertilizante mineral comercial Plantpar® (NPK + Micronutrientes). A dose de 1,5 kg ha^{-1} para a cultura, foi ajustada para as unidades experimentais, correspondendo a 4,29 g do produto por 100 L de solução nutritiva.

O experimento foi conduzido em 60 unidades experimentais (Figura 2), compostas por tanques de PVC com capacidade para 100 L, medindo 0,66 m de diâmetro superior e 0,41 m de altura. Os tanques foram preenchidos com o Latossolo Amarelo previamente caracterizado, o qual foi destorroado e peneirado para garantir a homogeneidade e remover detritos.

Na base de cada tanque com um orifício para permitir o escoamento do lixiviado, foi montado um sistema de drenagem, composto por uma camada de brita nº 0 e sobre ela uma tela de proteção. Para a quantificação da drenagem, baldes de polietileno de 8 L foram posicionados sob cada unidade experimental para coletar a solução drenada. O volume lixiviado era coletado no dia seguinte a cada evento de irrigação e mensurado com o auxílio de um béquer graduado.



Figura 2 - Vista das unidades experimentais instaladas no interior da casa de vegetação.

2.3 Instalação da cultura e condições iniciais

Para os experimentos um e dois, a instalação da cultura foi realizada por semeadura direta da beterraba, cultivar Maravilha, em 10 de maio de 2024. Em cada unidade experimental, o plantio foi feito em duas linhas, com espaçamento de 30 cm entre si e 10 cm entre plantas, visando uma população final de oito plantas por tanque.

Devido à natureza da semente de beterraba (glomérulo), que resulta na emergência de múltiplas plântulas por ponto de semeadura, realizou-se um desbaste em duas etapas. Sete dias após a emergência uniforme, o número de plântulas foi reduzido para duas por cova. Posteriormente, realizou-se o desbaste final para uma única plântula, fixando a população em oito plantas por unidade experimental.

Após o completo estabelecimento das plântulas, as unidades experimentais foram mantidas em capacidade de campo até o dia 03 de junho. A aplicação dos diferentes tratamentos hídricos teve início em 04 de junho, estendendo-se até 30 de julho, o que totalizou um período de 56 dias, com 51 dias de monitoramento efetivo da umidade do solo.

2.4 Determinação das propriedades hidráulicas do solo

As propriedades hidráulicas do solo foram determinadas antes do plantio, por meio da técnica de modelagem inversa (SIMUNEK et al., 2016). Para isso, foi coletada uma amostra de solo deformada da área experimental, na profundidade de 0,20 m. A amostra foi acondicionada em um tubo de PVC com 100 mm de diâmetro e 0,20 m de altura, simulando a densidade natural do solo, que é de 1.430 Kg m⁻³. A parte inferior da amostra foi vedada com tecido não tecido (TNT), para evitar a perda de partículas de solo durante o processo de saturação.

Após 24 horas, quando a amostra apresentou saturação visual, a base foi vedada com um cap de 100 mm, assegurando que os fluxos de saída de água ocorressem exclusivamente por evaporação. Com a amostra preparada, foi realizado o ensaio de evaporação, destinado à determinação precisa das propriedades hidráulicas do solo. Para a execução do ensaio, a amostra foi posicionada em uma plataforma de pesagem previamente calibrada.

Os dados de variação de massa foram registrados em sistema automatizado, composto por um Arduino MEGA, um conversor analógico-digital de 23 bits (modelo HX711) e um módulo Micro SD. Os dados foram gravados em intervalos de 10 minutos, até observar-se pequenas variações na massa da amostra, posteriormente levada a estufa de circulação forçada a 105°C para determinação da matéria seca. Estes dados foram utilizados para dois propósitos principais: a determinação da evaporação, com base na variação de massa ao longo do ensaio, para determinada a variação horária da evaporação; e a determinação do conteúdo de água no solo, utilizando o método gravimétrico. O conteúdo de água no solo foi calculado conforme a Equação (1), considerando as variações de massa e outros parâmetros previamente definidos.

$$\theta = \left(\frac{Mat - Msc}{Msc} \right) * \frac{ds}{da} \quad (1)$$

Em que: θ - conteúdo de água no solo (m³ m⁻³); Mat- massa atual do solo (Kg); Msc- massa do solo seco (Kg); ds- densidade do solo (Kg m⁻³); densidade da água (Kg m⁻³).

Esses dados foram processados no software HYDRUS 1D (SIMUNEK et al., 2016) permitindo a obtenção dos valores α , n por modelagem inversa, demais valores (Tabela 2).

Tabela 2 - Propriedades hidráulicas do solo do experimento.

θ_s (m ³ m ⁻³)	θ_r (m ³ m ⁻³)	α (m ⁻¹)	n (-)	m (-)	K_s (m dia ⁻¹)
0,4594	0,0284	3,8727	1,5941	0,3727	1,2916

θ_s - é conteúdo de água no solo saturado (m³ m⁻³); θ_r - Conteúdo residual de água no solo (m³ m⁻³); α , n , m - coeficientes empíricos da Equação de van Genuchten-Mualen; K_s - é a condutividade hidráulica saturada do solo (m dia⁻¹).

2.5 Construção e calibração das sondas de TDR

As sondas de TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) foram construídas de forma artesanal e calibradas conforme a metodologia de Silva, Coelho, e Coelho Filho, (2015). As sondas possuíam as seguintes características: três hastes de aço inoxidável, com comprimento fora da resina de 0,1 m e espaçadas entre si por 0,017 m; cabos coaxiais de 50 Ω com comprimento de 1,5 m; e a camada de resina de poliéster no início das hastes tinha 0,05 m.

Para a calibração das sondas, utilizaram-se dois tubos de PVC com 75 mm de diâmetro e 0,2 m de altura, preenchidos com solo. Na base de cada tubo, foi fixada uma malha, permitindo a drenagem da água sem perda de partículas de solo. Após a saturação do solo com água doce de CE de 0,3 ds m^{-1} , as sondas foram inseridas e iniciou-se a pesagem do conjunto solo-tubo-sonda-malha e a medida da constante dielétrica aparente (K_a). A diferença de massa entre as pesagens permitiu determinar o conteúdo de água no solo, conforme a Equação (2).

$$\theta = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \right) * \frac{d_s}{d_a} \quad (2)$$

Em que: θ é o potencial de água no solo; M_1 é a massa total do solo úmido, sonda, tubo e tela (Kg); M_2 é a massa total do sistema solo seco, sonda, tubo e tela (Kg); M_3 é a massa da sonda, tubo e tela (Kg); d_a é a densidade da água (1,0 Kg dm^{-3}); d_s é a densidade do solo (1,3 Kg dm^{-3}).

A determinação do conteúdo de água no solo foi realizada desde a condição de saturação até o teor residual. Para cada nível de umidade obtido utilizando o equipamento TDR 100 da Campbell, registrou-se o valor de K_a pela (Equação 3). A partir dos pares de dados (θ e K_a), foi ajustada uma equação de calibração (Equação 4), permitindo estimar a umidade real do solo.

$$K_a = \left(\frac{(\theta + 0.1758)}{0.1138} \right)^2 \quad (3)$$

$$\theta_0 = -0,0007 K_a^2 + 0,0393 K_a - 0,15 \quad R^2 = 0,9549 \quad (4)$$

Em que: θ - umidade volumétrica, ($m^3 m^{-3}$); K_a - constante dielétrica.

2.6 Distribuição do sistema de irrigação e manejo da irrigação.

O sistema de irrigação utilizado foi o de microirrigação por gotejamento, com acionamento manual. Composto por uma estação de bombeamento equipada com motobomba de 0,5 cv, sistema de filtragem com filtro de disco, rede principal de 32 mm e três linhas de derivação também com 32 mm de diâmetro. Cada parcela experimental contava com seis gotejadores autocompensados de vazão nominal de 2,6 L h^{-1} , dispostos em três por fileira de planta, totalizando uma vazão de 15,6 L h^{-1} por parcela experimental. O sistema foi

dimensionado para operar dentro da faixa de compensação dos emissores que varia de 5 a 35 mca, com pressão de saída da bomba variando entre 6 e 10 mca (Figura 3a-b).

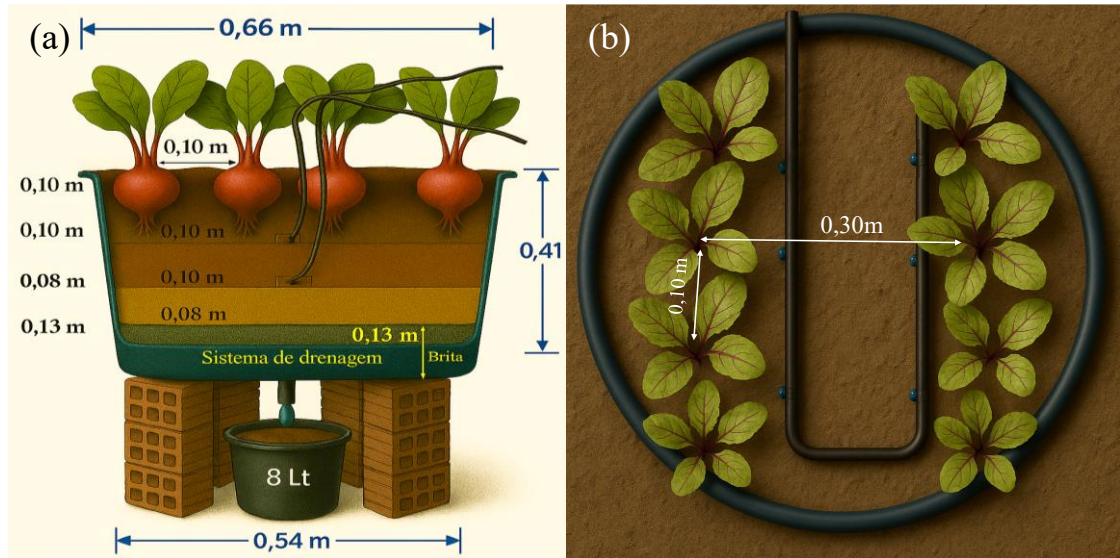


Figura 3 (a) Imagem ilustrativa e fora de escala de uma unidade experimental; (b) - imagem ilustrativa e fora de escala, vista aérea da unidade experimental.

O conteúdo de água no solo foi monitorado diariamente por meio de duas sondas capacitivas, instaladas horizontalmente no centro da unidade experimental, entre as linhas de cultivo, posicionadas nas profundidades de 0,10 m e 0,20 m as leituras eram realizadas em três momentos: antes da irrigação, 30 minutos após a aplicação e sete horas após o evento de rega. A média das leituras obtidas foi transformada em K_a por meio da Equação 3 e, em seguida, convertida para umidade volumétrica real do solo (θ), utilizando-se a equação de calibração (Equação 4). Com base na umidade no monitoramento no início da manhã, determinava-se a necessidade de irrigação. O manejo era realizado sempre que os valores de umidade atingiam os níveis correspondentes aos potenciais matriciais predefinidos para cada tratamento (conforme descrito nas Tabelas 3 e 4).

Com base na umidade real do solo e nos valores de referência de cada tratamento, o tempo necessário para a irrigação foi calculado utilizando as seguintes equações:

No experimento um e dois a equação 5 foi utilizada para calcular de irrigação.

$$IRN = (\theta\Psi - \overline{\theta_{atual}}) \cdot Vs \quad (5)$$

No experimento dois a irrigação real necessária foi calculado pela equação 6:

$$IRN = (\theta_{cc} - \overline{\theta_{atual}}) \cdot Vs \quad (6)$$

O volume de solo molhado (V_s) dos experimentos, foi calculado considerando uma área de $0,3 \text{ m} \times 0,3 \text{ m}$ e uma profundidade efetiva de $0,27 \text{ m}$ resultando em $V_s = 0,0243 \text{ m}^3$.

Em que: IRN - Irrigação Real necessária (m^3); θ_Ψ - Umidade associada ao potencial de água do solo no tratamento ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); $\overline{\theta_{\text{atual}}}$ - umidade atual média do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_{cc} - capacidade de campo - $1,09 \text{ mca}$ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); V_s - volume de solo (m^3).

O tempo de irrigação foi então estimado com base no volume necessário e na vazão da rede, conforme a Equação 7:

$$TI = \left(\frac{IRN}{Q_{\text{rede}}} \right) \quad (7)$$

Em que: TI- tempo de irrigação (minutos); Q_{rede} - vazão da rede por tanque ($\text{m}^3 \text{ hora}^{-1}$)

Os valores de umidade do solo utilizados para o cálculo da irrigação nos experimentos 1 e 2, referentes aos diferentes potenciais matriciais das faixas de manejo (Tabela 3 e 4).

Tabela 3 - Faixas de potenciais e umidade do solo do experimento 1.

Faixa de potencial matricial (mca)	Faixa de umidade correspondente aos potenciais matriciais ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
0,50 - 0,55	0,2887 - 0,2778
1,00 - 1,19	0,2135 - 0,1961
2,00 - 2,23	0,1126 - 0,1031
3,00 - 3,42	0,2051 - 0,1226
4,00 - 4,84	0,2051 - 0,1090

Tabela 4. Faixas de potenciais e umidade do solo do experimento 2.

Faixa de potencial matricial (mca)	Faixa de umidade correspondente aos potenciais matriciais ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
1,09 - 1,57	0,2051 - 0,1731
1,09 - 2,18	0,2051 - 0,1482
1,09 - 2,60	0,2051 - 0,1367
1,09 - 3,31	0,2051 - 0,1226
1,09 - 4,31	0,2051 - 0,1090

O monitoramento do conteúdo de água no solo teve como objetivo acompanhar a dinâmica de redistribuição da água no perfil do solo, permitindo determinar a variação da umidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), entre os eventos de rega, de acordo com o tratamento adotado (mca).

Os dados de variação da umidade real entre eventos de rega, nos diferentes potenciais matriciais utilizados nos tratamentos do Experimento 1, estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Dados da umidade real do solo entre os eventos de rega relacionados a tensão de água no solo para os tratamentos adotados no experimento um.

ψ	0,50		1,00		2,00		3,000		4,000	
$\bar{\theta}_R$	(m^3m^{-3})	(mca)	(m^3m^{-3})	(mca)	(m^3m^{-3})	(mca)	(m^3m^{-3})	(mca)	(m^3m^{-3})	(mca)
$\bar{\theta}_{inf}$	0.2778	0.55	0.1961	1.193	0.1449	2.29	0.1205	3.42	0.1031	4.838
$\bar{\theta}_{sup}$	0.2948	0.474	0.2185	0.95	0.1837	1.38	0.1476	2.2	0.1199	3.468
$\bar{\theta}_{med}$	0.2903	0.493	0.2055	1.086	0.155	1.98	0.1298	2.91	0.1152	3.799

$\bar{\theta}_R$ – Umidade real do solo; $|\psi|$ – Potencial de água no solo; $\bar{\theta}_{inf}$ - Média entre as umidades reais no solo antes da rega; $\bar{\theta}_{sup}$ - $\bar{\theta}_{med}$ Média entre as umidades reais no solo após a rega; $\bar{\theta}_{med}$ - Média entre todos os valores de umidades reais no solo durante o ciclo de cultivo para o tratamento.

Na Tabela 6 estão apresentados os dados de variação da umidade real do solo (m^3m^{-3}) entre os eventos de rega, em função das faixas de potencial matricial (mca) adotadas nos tratamentos do Experimento 2.

Tabela 6 – Dados de variação da umidade real do solo (m^3m^{-3}) entre os eventos de rega, em cada faixa de potencial matricial adotada (mca) referentes no experimento três.

ψ	1,09 -1,50		1,09 -1,50		1,09 -2,50		1,09 -3,0		1,09 -4,0	
$\bar{\theta}_R$	(m^3m^{-3})	(mca)	(m^3m^{-3})	(mca)	(m^3m^{-3})	(mca)	(m^3m^{-3})	(mca)	(m^3m^{-3})	(mca)
$\bar{\theta}_{inf}$	0,1731	1,566	0,1482	2,181	0,1367	2,597	0,1226	3,305	0,1090	4,308
$\bar{\theta}_{sup}$	0,2078	1,060	0,2021	1,125	0,2219	0,919	0,2074	1,064	0,2098	1,037
$\bar{\theta}_{med}$	0,1961	1,200	0,1833	1,386	0,1825	1,400	0,1705	1,616	0,1551	1,980

Os potenciais matriciais foram definidos como valores para cálculo da irrigação em cada tratamento, porém a planta esteve exposta a faixas de tensão da água no solo, devido à variação natural da umidade entre os eventos de irrigação. Assim, cada tratamento assumiu caráter qualitativo, uma vez que o intervalo entre a tensão mínima (após irrigação) e a tensão máxima (antes da irrigação) variava conforme o comportamento de redistribuição da água no solo. Com base nos valores de umidade real (m^3m^{-3}) obtidos ao longo do ciclo, foi possível estabelecer faixas de umidade associadas a cada potencial matricial adotado como tratamento, refletindo as condições hídricas efetivamente vivenciadas pelas plantas.

2.7 Delineamento experimental

O delineamento experimental adotado foi em blocos inteiramente casualizados, com cinco tratamentos e seis repetições, totalizando 30 unidades experimentais. No Experimentos 1 os tratamentos consistiram em cinco potenciais matriciais utilizados como referência para o cálculo da irrigação: -0,5; -1,0; -2,0; -3,0 e -4,0 mca. Os potenciais de -0,5 e -1,0 mca foram escolhidos por se aproximarem das condições ideais de capacidade de campo para o solo em

questão. Os valores de -2,0 e -3,0 mca foram definidos de forma intermediária, com base em critérios técnicos de graduação de estresse, enquanto -4,0 mca foi adotado como limite inferior crítico para culturas hortícolas, conforme recomendado por Doorenbos e Pruitt (1977).

No Experimento 2, os tratamentos consistiram em cinco faixas de potencial matricial da água no solo: -1,09 a -1,5; -1,09 a -2,0; -1,09 a -2,5; -1,09 a -3,0; e -1,09 a -4,0 mca, tendo como referência a capacidade de campo (-1,09 mca), determinada com base na curva de retenção de umidade descrita por Liang et al. (2016). Os limites inferiores de -1,5 e -2,5 mca foram escolhidos por já terem sido utilizados em estudos anteriores com beterraba sob tensões fixas. Os valores de -2,0 e -3,0 mca foram definidos como níveis intermediários de estresse hídrico, enquanto -4,0 mca foi novamente adotado como limite crítico, de acordo com Doorenbos e Pruitt (1977).

2.8 Avaliação das variáveis agronômicas, fisiológicas e qualitativas

A colheita foi realizada aos 80 dias após a germinação (DAG) em ambos os ciclos. Foram avaliadas variáveis agronômicas, fisiológicas e qualitativas. Quatro plantas representativas por parcela foram selecionadas para avaliação da parte aérea.

O número de folhas foi feito considerando apenas folhas completamente expandidas. O comprimento, largura e altura das folhas foram mensurados com régua graduada (Figura 4).

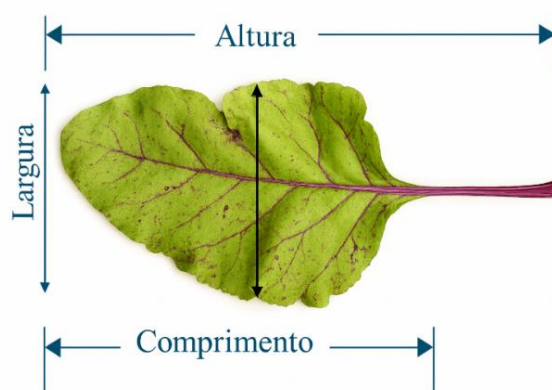


Figura 4 - Imagem ilustrativa e fora de escala de dimensões da folha da beterraba maravilhosa.

A área foliar foi determinada segundo o método de Schmildt, Oliveira, e Dousseau-Arantes, (2023), utilizando a relação entre a matéria seca total e massa seca de 5 discos foliares coletados com calador (1 cm de diâmetro) na primeira folha totalmente expandida, Equação 8:

$$AF = \frac{(MST \cdot ATD)}{MSD} * NF \quad (8)$$

Em que: A_F - Área foliar total (cm^2); MST - matéria seca total da folha (g); ATD - área total dos discos (cm^2); MSD - matéria seca dos discos (g) e número de folhas por planta.

A produtividade total e comercial foi calculada a partir da massa fresca das raízes.

$$PT = \left(\frac{\text{produção (Kg)}}{\text{área(m}^2\text{)}} \right) / 1000 \quad (9)$$

$$PC = \left(\frac{\text{produção raízes > 4mm diâmetro (Kg)}}{\text{área(m}^2\text{)}} \right) / 1000 \quad (10)$$

Onde: PT – Produtividade total (t ha⁻¹); PC – Produtividade comercial (t ha⁻¹);

Também foram monitorados o volume de água aplicado e a evapotranspiração por estágio fenológico, utilizados no cálculo da eficiência do uso da água (EUA), produtividade da água (PA) e eficiência da irrigação (EI), conforme descrito a seguir.

A evapotranspiração da cultura (ETc) foi estimada com base no balanço de água no solo, a partir das leituras de TDR em uma parcela por tratamento. Foram quantificados o volume irrigado e o volume drenado. A Equação utilizada foi:

$$ETc = \frac{(I - D) \pm \Delta v}{0,66^2 * \pi / 4} \quad (11)$$

$$\Delta v = (\theta_{i+1} - \theta_i) * V_s \quad (12)$$

A eficiência EUA e EI foram determinada pelas equações 13 e 14:

$$EUA = \left[\frac{\left(\frac{\sum ETc}{\sum ITN} \right)}{\left(\frac{0,66^2 * \pi}{4} \right)} \right] * 100 \quad (13)$$

$$EI = \left(\frac{\sum ITN - \sum D}{\sum ITN} \right) * 100 \quad (14)$$

A produtividade comercial da água (PA) foi calculada por:

$$PAc = \left(\frac{\text{produção raízes > 4mm diâmetro (Kg)}}{\sum ITN} \right) \quad (15)$$

Em que: ETc = Evapotranspiração da beterraba por parcela experimental (m³ parcela); I - volume irrigado (m³ parcela⁻¹); D - volume drenado (m³); Δh - Variação de armazenamento da água no solo (m³); θ_{i+1} - conteúdo de água no solo antes da irrigação subsequente (m³ m⁻³); θ_i - conteúdo de água no solo antes da irrigação atual; e V_s - volume de solo (m³); EUA- eficiência do uso da água (%); ΣETc - somatória da evapotranspiração por unidade experimental durante o ciclo de produção (m³ parcela); ΣIRN - somatória da Irrigação por unidade experimental no ciclo de produção (m³); PA - produtividade da água (Kg m⁻³); Produção - Produção raízes maiores que 4mm de diâmetro (Kg); ΣD - somatório do volume drenado por unidade experimental durante o ciclo de produção (m³).

A eficiência do uso da água (EUA) foi calculada seguindo as diretrizes tomadas por Fernandes et al. (2020). Nas condições em que a IRN for menor que a Etc, esse resultado apesar de alto, não indica eficiência prática pois a quantidade de água aplicada não foi o suficiente para o suprimento da demanda da cultura, indicando um déficit hídrico.

Para determinar fator de depleção de água no solo (f), foi utilizado um rearranjo da equação do cálculo da capacidade real de água no solo.

$$f = \frac{(\theta_{superior} - \theta_{inferior})}{(\theta_{superior} - \theta_{residual})} \quad (16)$$

Em que: θ superior - umidade superior da faixa ($m^3 m^{-3}$) que substitui θ_{cc} ; θ inferior - umidade inferior da faixa ($m^3 m^{-3}$) que substitui $\theta_{crítica}$; $\theta_{residual}$ - umidade do solo ($m^3 m^{-3}$) que substitui θ_{pmp} .

Para determinar o teor relativo de água (TRA), foram coletados 5 discos (1 cm de diâmetro) removidos da primeira folha totalmente expandida. Os discos foram pesados obtenção da massa da matéria fresca (MF), saturados em água por 12 horas (massa túrgida – MT), e secos a 65 °C por 48 horas (massa seca – MS). O TRA foi calculado conforme (BARRS; WEATHERLEY, 1962).

$$TRA = \left(\frac{MF - MS}{MT - MS} \right) \quad (17)$$

Em que: TRA - MF - Massa fresca total dos discos(g); MT - Massa túrgida total dos discos (g); MS - Massa seca total dos discos (g).

A tensão de água na folha foi medida com equipamento WP4 da Teros, 24 horas antes e 30 horas após a irrigação. As análises de qualidade da raiz incluíram sólidos solúveis totais (°Brix), obtidos por refratometria digital (Atago Pocket), e acidez titulável, mensurada com equipamento PAL-Easy ACID1.

2.9 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância, com teste F a 5% de significância. Como os tratamentos têm caráter qualitativo, aplicou-se a comparação de médias pelo teste de Tukey. As variáveis ETc, EUA, EA e EI, por terem sido estimadas a partir de uma única parcela experimental por tratamento, foram tratadas de forma descritiva, com análise comparativa entre os tratamentos, sem inferência estatística paramétrica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a condução dos experimentos, as condições meteorológicas apresentaram variações. No período de 10 de maio a 31 de julho, correspondente aos experimentos I e II, a temperatura média do ar fora da estufa foi de aproximadamente 22,7 °C. A temperatura máxima variou entre 20,8 °C e 26,5 °C, enquanto a mínima oscilou de 20,2 °C a 25,4 °C (Figura 5).

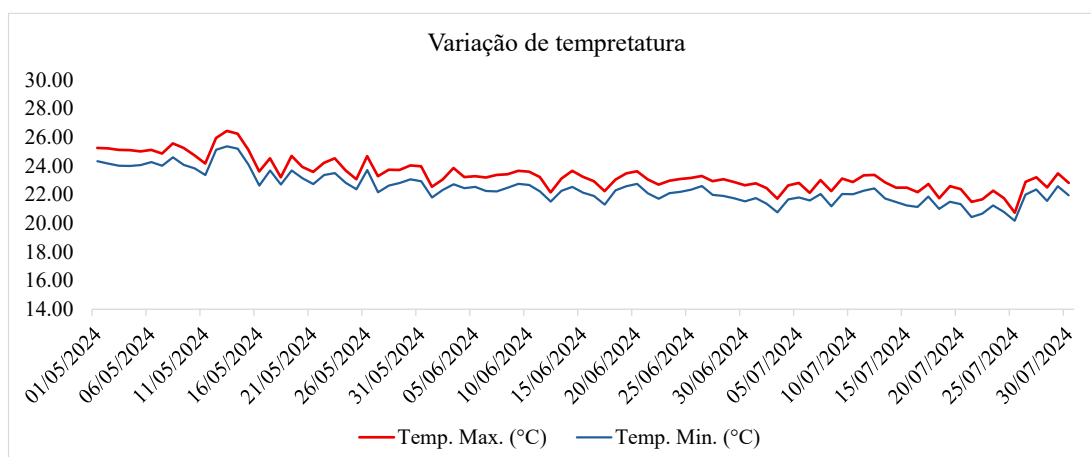


Figura 5. Variação diária das temperaturas do ar máxima e mínima durante o ciclo de cultivo da beterraba maravilha, estação meteorológica da Embrapa Mandioca e Fruticultura, em Cruz das Almas – BA. **Fonte:** <https://bdmep.inmet.gov.br/>

As variações da umidade no solo, relativas os potenciais matriciais adotadas por tratamento do Experimento I podem ser vistas na Figura 6. Em relação a umidade na capacidade de campo de 0,2055 m³ m⁻³ ($\psi = -1,09$ mca), T1 com tensão de manejo de -0,5 mca, a umidade do solo apresentou o valor médio durante todo o ciclo de cultivo de 0,2903 m³ m⁻³ ($\psi = -0,49$ mca), com oscilações entre 0,2778 m³ m⁻³ antes da irrigação ($\psi = -0,55$ mca) e 0,2948 m³ m⁻³ após a rega ($\psi = -0,47$ mca) mantendo-se durante todo o ciclo acima da capacidade de campo. No tratamento T2 com tensão de manejo de -1,0 mca, onde o valor médio da umidade média no ciclo foi 0,2055 m³ m⁻³ ($\psi = -1,09$ mca), variando entre 0,1961 m³ m⁻³ ($\psi = -1,19$ mca) antes da irrigação e 0,2185 m³ m⁻³ ($\psi = -0,95$ mca) após a irrigação, operando dentro de uma faixa de variação próxima da capacidade de campo durante todo o ciclo.

Para os tratamentos com tensões de manejo mais negativas (-2,0; -3,0 e -4,0 mca), registraram-se umidades médias menores, no tratamento de -2,0 mca, a umidade média foi de 0,1550 m³ m⁻³ ($\psi = -1,98$ mca), com valores mínimos de 0,1449 m³ m⁻³ ($\psi = -2,29$ mca); em -3,0 mca, registrou-se 0,1298 m³ m⁻³ ($\psi = -2,91$ mca) de umidade média, com mínimas de 0,1205 m³ m⁻³ ($\psi = -3,42$ mca); no tratamento mais restritivo (-4,0 mca) atingiu médias de 0,1152 m³ m⁻³ ($\psi = -3,80$ mca) e mínimas de 0,1031 m³ m⁻³ ($\psi = -4,84$ mca), caracterizando déficit hídrico.

Esses tratamentos operaram sempre abaixo da capacidade de campo, apenas T3 que após as regas se aproximava da umidade na capacidade de campo $0,1837 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ($\psi = -1,38 \text{ mca}$).

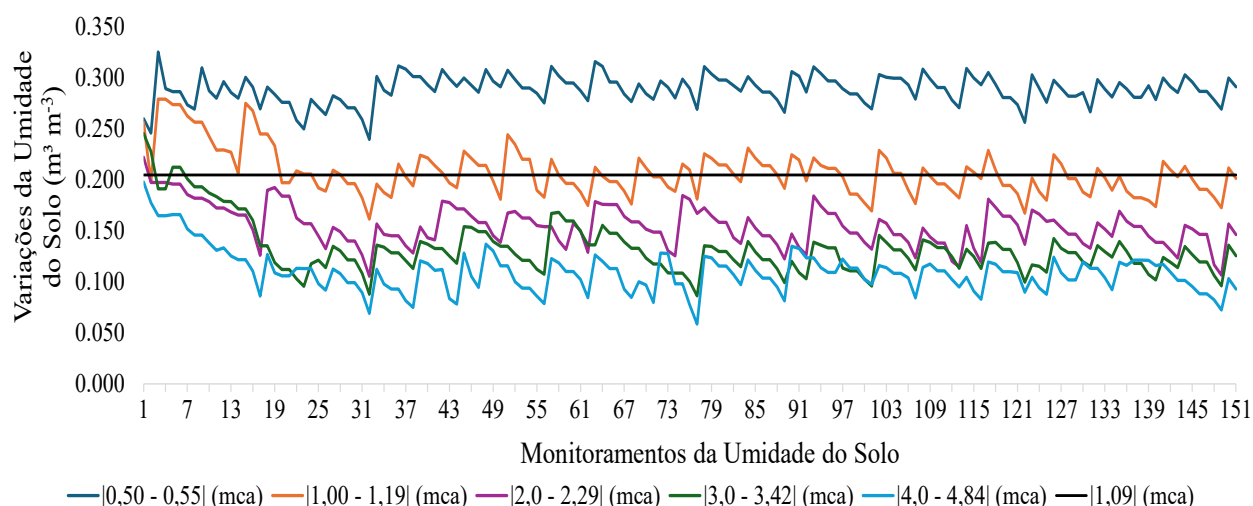


Figura 6: Variações da umidade no solo, entre os monitoramentos.

Na Figura 7 podem ser vistos a evapotranspiração acumulada da cultura (ETc) e a lâmina de água aplicada (LA) em cada faixa de tensões do experimento 1. Observa-se que, apesar de não ter sido definido um intervalo fixo entre irrigações, no tratamento com maior disponibilidade de água, T1 ($-0,5$ a $-0,55 \text{ mca}$), foi necessária a maior frequência de irrigações (34 eventos), o que resultou na maior lâmina total aplicada (LA), de $90,64 \text{ mm}$. Esta aplicação superou a evapotranspiração da cultura (ETc), estimada em $81,11 \text{ mm}$, gerando um volume drenado de $8,97 \text{ mm}$, correspondente a $9,9\%$ da água aplicada durante o ciclo.

O manejo hídrico mais equilibrado foi observado em T2 e T3. Em T2 ($-1,0$ a $-1,19 \text{ mca}$), a lâmina aplicada de $73,16 \text{ mm}$ foi compatível com a demanda da ETc ($71,22 \text{ mm}$), caracterizando um manejo eficiente com drenagem mínima ($2,31 \text{ mm}$), já no tratamento T3 ($-2,0$ a $-2,23 \text{ mca}$), houve de déficit hídrico de cerca de $-7,4\%$, com a ETc ($66,09 \text{ mm}$) superando a LA ($61,56 \text{ mm}$), ainda assim considerado um tratamento que promoveu um equilíbrio entre lâmina aplicada e demanda evapotranspirativa da beterraba maravilha.

O déficit hídrico tornou-se mais acentuado nos tratamentos com menor disponibilidade de água no solo. No tratamento T4 ($-3,0$ a $-3,42 \text{ mca}$), a lâmina de água aplicada foi de $53,20 \text{ mm}$, distribuída em 21 eventos de rega, resultando em um déficit de $13,95\%$ em relação à ETc estimada de $60,62 \text{ mm}$. No tratamento mais restritivo, T5 ($-4,0$ a $-4,84 \text{ mca}$), a lâmina aplicada foi a menor, com $48,64 \text{ mm}$ distribuídos em 22 eventos de rega, gerando um déficit de $13,03\%$ em relação à ETc de $54,98 \text{ mm}$. Esses balanços hídricos negativos evidenciam que, nessas

condições, a demanda hídrica da cultura não foi plenamente atendida, quantificando os diferentes níveis de estresse impostos.

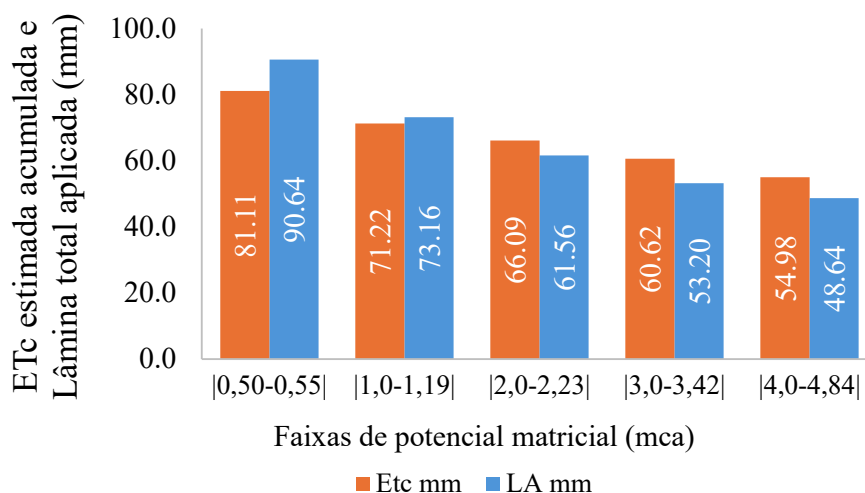


Figura 7. Evapotranspiração acumulada (ETc) e lâmina de água aplicada (LA) na beterraba.

A resposta da beterraba ao déficit hídrico está associada à severidade e à duração do estresse, afetando a planta de diferentes formas e intensidades. Entre os principais efeitos, destacam-se o aumento da temperatura foliar, danos às membranas celulares e o extravasamento de eletrólitos, bem como alterações no índice de clorofila, no teor relativo de água nas folhas e na densidade estomática. Kaya e Ergin (2025) evidenciaram esses impactos ao encontrarem diferenças significativas nos parâmetros supramencionados ao avaliar a tolerância ao déficit hídrico em cultivares de beterraba vermelha e sacarina.

Na mesma linha Bodner e Alsalem (2023), investigaram o padrão de enraizamento e a densidade estomática sob déficit hídrico progressivo. Seus resultados revelaram que, nas fases iniciais do ciclo, com 80% de disponibilidade hídrica no solo, a elevada demanda atmosférica aumentou a taxa de transpiração em mais de 32%. À medida que o déficit hídrico aumentou, os autores observaram inicialmente uma redução de 15% na taxa de transpiração, que atingiu valores 29% inferiores ao pico quando a disponibilidade caiu para 40%.

Esses resultados corroboram os achados do presente trabalho, no qual a maior disponibilidade de água no solo proporcionou uma maior evapotranspiração da cultura (ETc) e, na faixa de potencial matricial (-2,0 a -2,23 mca), evidenciou-se equilíbrio entre a lâmina de água aplicada e o evapotranspirado pelas plantas de beterraba maravilha.

A Figura 8 apresenta os índices de eficiência do uso da água (EUA) e eficiência da irrigação (EI), permite avaliar tanto a performance do sistema quanto a resposta da cultura ao manejo adotado. A (EI), que mensura a fração da água aplicada que fica efetivamente

armazenada na zona radicular, apresentou valores superiores a 90% em todos os tratamentos (Figura 8). O tratamento T1 registrou o menor valor de EI (90,10%), um resultado diretamente relacionado ao maior volume drenado observado nesta condição (8,97 mm). Nos demais tratamentos, a EI superou 96%, esses resultados são um reflexo direto do manejo eficiente da irrigação, que garantiu a aplicação da água com perdas mínimas por percolação profunda.

Em relação à (EUA), que neste trabalho representa a razão entre a água consumida pela cultura via evapotranspiração (ETc) e a lâmina aplicada (LA), os dados revelam que, nos tratamentos sob déficit hídrico (T3, T4 e T5), a EUA atingiu seu valor máximo de 100%. Contudo, este valor é um indicador matemático, significando que a cultura consumiu toda a água aplicada. Nesse caso os valores de 100 aqui encontrados em T4 e T5 proporcionaram déficit a planta, podendo-se considerar que essa eficiência não se reflete em eficiência produtiva. Dessa forma, a maior EUA em uma condição de balanço hídrico equilibrado foi a do tratamento T2, que atingiu 97,34%, pois além de apresentar um valor alto, não proporcionou déficit em relação a água aplicada.

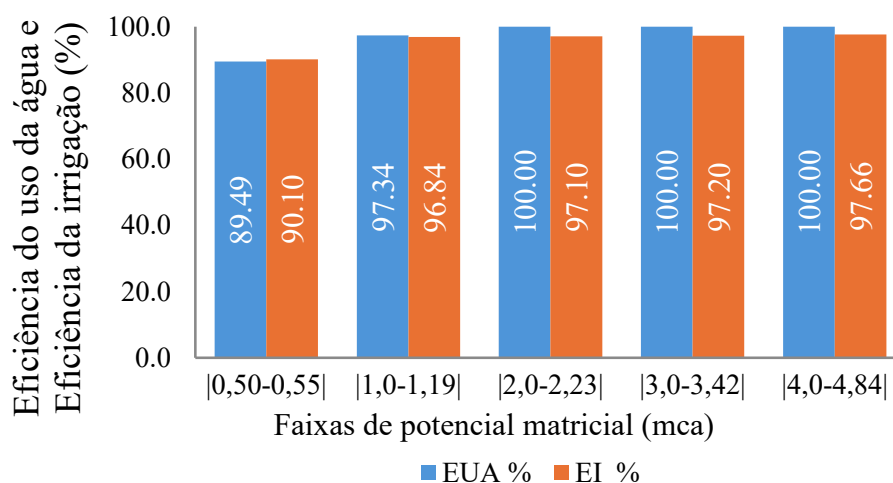


Figura 8. Eficiência do uso da água e Eficiência de irrigação da beterraba maravilha.

Vale ressaltar que, no início do experimento, todos os tratamentos exibiram drenagem, reflexo das condições físicas iniciais do solo (peneirado e destorreado), que favoreceram o escoamento inicial da água.

Na Tabela 7 está apresentada a análise de variância (ANOVA) para as variáveis da parte aérea. O número de folhas e a altura de folha (limbo e pecíolo) não diferiram significativamente entre os tratamentos ($p > 0,05$). Porém, o comprimento (apenas limbo) e largura foliar, além da parte área foliar por planta apresentaram diferenças significativas ($p < 0,01$).

Os resultados não revelaram diferenças estatísticas significativas para as variáveis no número, e altura das folhas entre os tratamentos (Tabela 7). Sendo observado no presente estudo uma redução no número e turgescência das folhas ao longo do ciclo, mesmo no final do ciclo não havendo diferença estatística nessa variável, este resultado está em consonância com os achados de Silva et al. (2013), que, ao estudarem duas cultivares de beterraba sob diferentes tensões, também reportaram um decréscimo no número de folhas, intensificado nos tratamentos mais restritivos (-3,5 a -6,5 mca).

Tabela 7. Análise de variância (ANOVA) para variáveis morfológicas da parte aérea da beterraba Maravilha sob diferentes tensões de água no solo.

Quadro da análise de variância						
Fonte de Variação	GL	Número de Folhas (cm)	Altura de Folha (cm)	Comprimento de folha (cm)	Largura de folha (cm)	Área foliar por planta (cm ²)
		QM ^{ns}	QM ^{ns}	QM**	QM**	QM**
Tratamento	4	0,75	1,5947	3,6025	6,4223	174431
Bloco	5	6,53	0,8580	1,7478	1,5002	103291
Resíduo	20	0,43	3,7076	0,5757	1,0018	13402
CV		12,55%	6,38%	4,20%	9,84%	13,91%

*GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; CV: coeficiente de variação; ns: não significativo; *: significativo a 5% de probabilidade. **: significativo a 1% de probabilidade.

Conforme a análise estatística, houve efeito significativo das faixas de tensão sobre o desenvolvimento da parte aérea (Figura 9a-c). Os tratamentos com maior disponibilidade hídrica, T1 e T2, promoveram os maiores valores para comprimento 19,27 cm e 18,27 cm (Figura 9a), largura 11,59 cm e 10,48 cm (Figura 9b), e área foliar 1052,60 cm² e 980,23 cm² (Figura 9c) respectivamente.

A partir do tratamento T3, observou-se uma tendência de redução nessas variáveis nos tratamentos com menor disponibilidade de água no solo, atingindo os menores valores no tratamento T5 que comparado ao tratamento com maior disponibilidade de água (T1), em (T5) houve reduções de 11,2% no comprimento (17,12 cm), 24,3% na largura (8,77 cm), e 33,1% na área foliar (704,32 cm²). Este comportamento está diretamente associado aos diferentes níveis de umidade mantidos no solo em cada tratamento (Figura 6). Como por exemplo maior desenvolvimento vegetativo em T1 e T2 com maiores teores de água no solo ao longo do ciclo mantendo a umidade do solo dentro da faixa de capacidade de campo nestes tratamentos.

Estes resultados estão em consonância com os de Miranda e Pereira (2019), que, ao estudarem a cultivar Early Wonder sob tensões de água no solo (-1,5 a -6,5 mca), também concluíram que os maiores valores de parte aérea, número e comprimento de folhas foram obtidos mantendo o solo mais úmido, em torno de -1,5 mca. Ainda nessa linha de manejo por

tensão, Silva et al. (2015), ao avaliarem as cultivares Early Wonder e Itapuã 202, observaram que a massa da parte aérea não diferiu entre as cultivares, reforçando que a resposta da beterraba a diferentes potenciais matriciais é um fator limitante no desenvolvimento vegetativo.

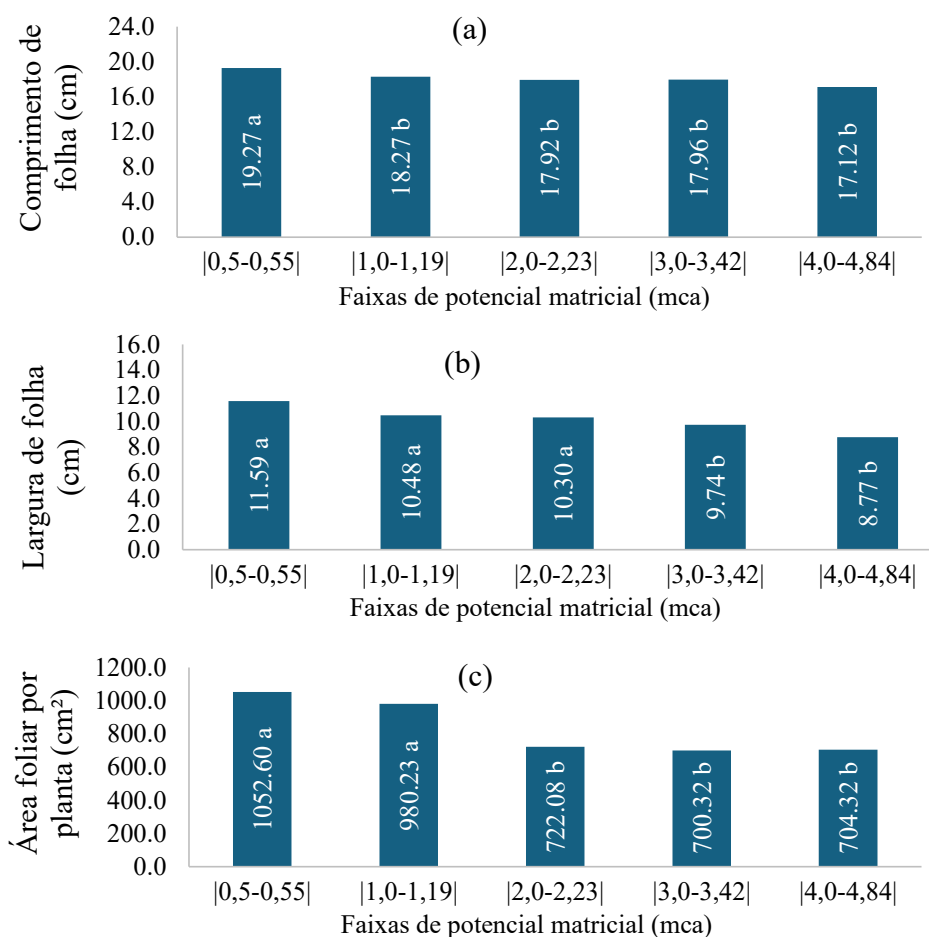


Figura 9 (a) - Comprimento de folha da beterraba maravilha. **(b)** - largura de folha da beterraba maravilha. **(c)** - área foliar por planta da beterraba maravilha.

Adicionalmente, a própria escolha do manejo via solo como ferramenta para otimizar o desenvolvimento da cultura encontra respaldo na literatura. Azevedo et al. (2025), por exemplo, constataram que, para a variável área foliar, os sistemas de manejo baseados no solo foram estatisticamente superiores aos baseados no clima. Contudo, é importante ressaltar o desenvolvimento da parte pode ser influenciado por outros fatores de manejo. No presente estudo, o valor máximo de área foliar foi inferior ao registrado por Oliveira et al. (2022) para a cultivar maravilha em sistema orgânico, o que sugere que as diferenças no ambiente de cultivo também desempenham um papel crucial no potencial de crescimento da cultura.

A Tabela 8 apresenta a análise de variância para as variáveis de produtividade. Os resultados indicam que as diferentes faixas de potencial matricial influenciaram de forma

significativa ($p < 0,01$) a produtividade total, a produtividade comercial e a fração comercial de raízes. Em contrapartida, a Produtividade da Água Comercial (PAC) não apresentou diferença estatística significativa entre os tratamentos ($p > 0,05$). O baixo coeficiente de variação (CV) para a maioria das variáveis indica uma boa precisão experimental.

Tabela 8. Análise de variância (ANOVA) para variáveis produtividade total e comercial de raízes, produtividade da água comercial, e fração comercial de raízes de beterraba Maravilha.

Quadro da análise de variância					
Fonte de Variação		Produtividade Total (t ha ⁻¹)	Produtividade Comercial (t ha ⁻¹)	Produtividade da Água Comercial (t ha ⁻¹ mm ⁻³)	Fração Comercial de Raízes (%)
	GL	QM **	QM **	QM ^{ns}	QM**
Tratamento	4	62,792	190,369	0,0024040	1257,16
Bloco	5	5,007	39,172	0,0129719	856,71
Resíduo	20	5,135	15,653	0,0038776	181,00
CV		10,73 %	24,29 %	25,37%	18,01 %

*GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; CV: coeficiente de variação; ns: não significativo; *: significativo a 5% de probabilidade. **: significativo a 1% de probabilidade.

O tratamento com maior disponibilidade hídrica, T1, foi estatisticamente superior aos demais, alcançando uma produtividade total de 26,64 t ha⁻¹ e uma produtividade comercial de 25,39 t ha⁻¹ (Figura 10a e 10b). Os demais tratamentos (T2, T3, T4 e T5), embora apresentando uma tendência de queda na produtividade com o aumento do estresse hídrico, não diferiram estatisticamente entre si. Contudo, este resultado foi obtido com a maior lâmina de água aplicada (90,64 mm).

O desempenho superior do tratamento T1 pode estar relacionado ao maior desenvolvimento da parte aérea, e a maior disponibilidade de água no solo entre os tratamentos, com umidade do solo acima da capacidade de campo. Estes resultados corroboram os de Miranda e Pereira (2019), que identificaram máxima produtividade, na tensão de -1,5 mca com maior disponibilidade de água entre os tratamentos adotados.

Embora estatisticamente iguais, os tratamentos de déficit (T3 a T5) demonstram o impacto negativo do estresse hídrico no rendimento. Uma análise mais aprofundada revela o alto potencial agrônomo dos tratamentos T2. A produtividade comercial de T2 (17,71 t ha⁻¹) se encontra dentro da média nacional para a cultura, que é reportada entre 15 e 40 t ha⁻¹ (RESENDE E CORDEIRO 2007; TIVELLI et al., 2011). O ponto crucial é que este rendimento de raízes comercialmente viáveis, foram alcançados com um consumo de água significativamente menor. O tratamento T2, por exemplo, utilizou 17,48 mm a menos de água que T1, apresentando um balanço hídrico equilibrado e com drenagem mínima.

A comparação entre os extremos (T1 vs. T5) quantifica essa perda, revelando uma queda de aproximadamente 56% na produtividade comercial (de 25,39 para 11,16 t ha⁻¹). Mesmo o tratamento T3 (-2,0 a -2,23 mca), pode ser considerado uma estratégia viável em cenários de restrição hídrica, apresentou uma produtividade comercial de 14,35 t ha⁻¹, valor abaixo da média nacional para a cultura, que varia de 15 a 20 toneladas por hectare.

Isso demonstra que, embora a máxima da produtividade exija um consumo de água elevado (T1), é possível obter rendimentos altamente competitivos com um manejo hídrico mais restritivo. O tratamento T2 (-1,0 a -1,19 mca) surge como o "ponto de equilíbrio", pois alia uma produtividade comercial dentro da média esperada para a cultura com um balanço hídrico sustentável e alta eficiência hídrica. Para produtores em cenários de restrição hídrica, até mesmo o T3 representa uma alternativa.

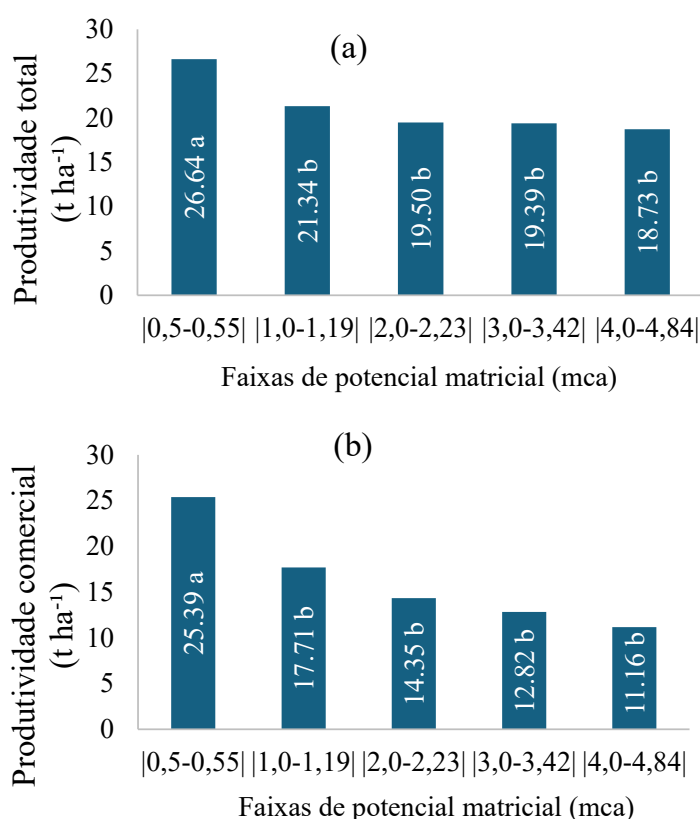


Figura 10 (a) Produtividade total da beterraba maravilha sob tesões de água no solo; (b) Produtividade comercial da beterraba maravilha sob tesões de água no solo.

A análise da Produtividade da Água Comercial (PAC) não revelou diferença estatística significativa entre os tratamentos ($p > 0,05$), conforme a Tabela 9 e (Figura 11a). No entanto, observa-se uma tendência numérica de maiores valores de PAC nos tratamentos mais secos. Este comportamento está associado à matemática do índice: como a PAC é a razão entre a produtividade comercial e a lâmina de água aplicada (LA), os tratamentos com menor LA (T4

e T5) tendem a apresentar um valor de PAc numericamente elevado, mesmo com uma produtividade comercial inferior.

A variável que de fato expressa o efeito do manejo na qualidade da produção foi a Fração Comercial de Raízes, que apresentou diferença significativa ($p < 0,01$). O tratamento T1 resultou no maior percentual de raízes comerciais (95,48%), sendo estatisticamente superior aos tratamentos mais secos, T4 e T5, que apresentaram os piores resultados, com apenas 64,57% e 58,59% de aproveitamento, respectivamente (Figura 11b).

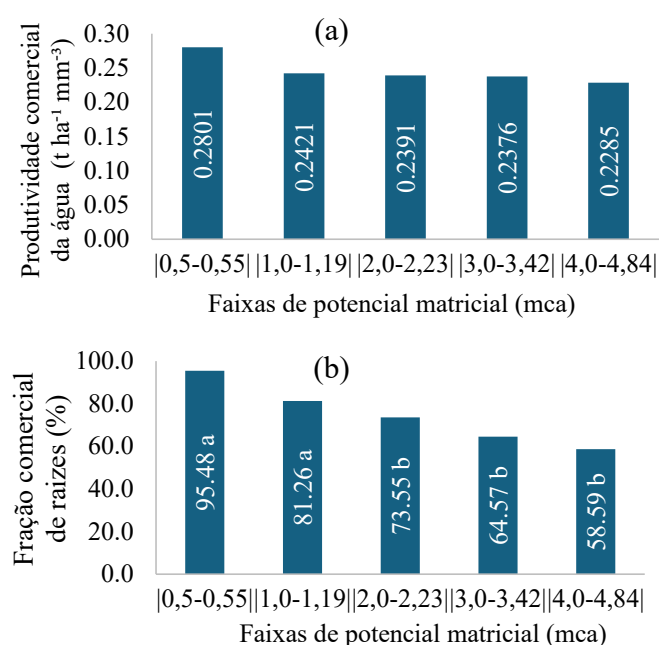


Figura 11 (a) Produtividade comercial da água de irrigação da beterraba maravilha; **(b)** Fração de raízes comercial da beterraba maravilha.

Embora a PAc não tenha variado estatisticamente, a capacidade de converter água em produto comercialmente viável diminuiu nos tratamentos com menor disponibilidade de água no solo. Isso reforça que o tratamento T2, que combinou uma alta produtividade comercial com uma alta fração de aproveitamento (81,26%). A produtividade da água (PA) é um indicador crucial para avaliar o desempenho agrícola em ambientes com restrição hídrica. Contudo, nem sempre a maior produção comercial resulta no maior valor de PA, e o inverso também ocorre.

A análise da Tensão de Água na Folha (TA) foi utilizada para avaliar a resposta fisiológica da cultura à disponibilidade hídrica do solo (Figura 12). Nas medições de equilíbrio com a água disponível no solo (06:00h, 24 horas após a rega), observou-se um comportamento distinto entre os tratamentos, em T1, apesar do solo ter mais água disponível, apresentou um potencial mais negativo (-123,42 mca) que o T3 (-56,10 mca). Isso pode ser atribuído a maior

parte aérea das plantas em T1, que, por possuírem maior área foliar, podem ter mantido uma maior taxa evapotranspiratória (BODNER E ALSALEM, 2023),

Ao meio-dia, sob maior demanda evaporativa, a TA tornou-se mais negativa em todos os tratamentos, com T1 novamente registrando o valor mais extremo (-225,42 mca). Notavelmente, o tratamento T3 apresentou a maior variação diária de TA (de -56,10 para -180,54 mca). Esta ampla capacidade de ajuste pode estar associada a mecanismos de aclimação fisiológica, como o acúmulo de osmólitos, e ajuste estomático (SILVA ET AL., (2019). Em contrapartida, os tratamentos sob estresse mais severo (T4 e T5) apresentaram menor variação diária de TA. Esse comportamento sugere uma limitação na capacidade da planta de extrair água do solo quando os potenciais matriciais são muito negativos, exigindo maior gasto energético e possivelmente induzindo um fechamento estomático mais constante.

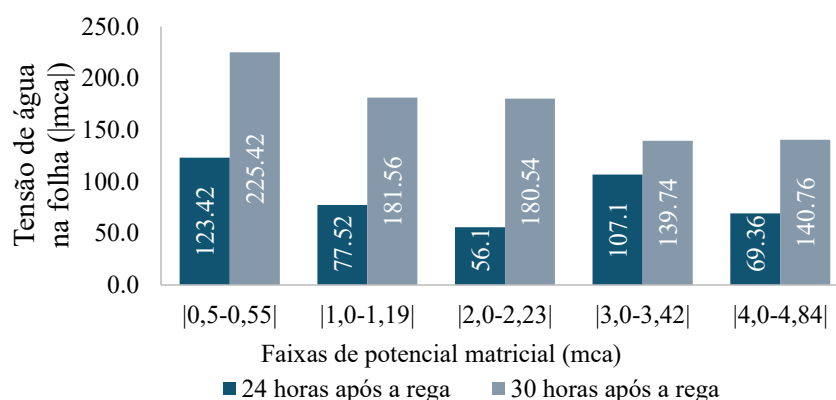


Figura 12 - Tensão de água na folha 24 e 30 horas após a rega.

Essa resposta está em consonância com estudos anteriores. Taiz et al. (2017), que identificaram a TA como um dos primeiros parâmetros fisiológicos a responder ao déficit hídrico em plantas superiores. Resultados semelhantes foram relatados por Mohammadi-Ahmadmahmoudi et al. (2020), ao avaliar hortaliças irrigadas sob diferentes lâminas em ambiente protegido, observaram que a TA declina sob estresse hídrico, mas é rapidamente restabelecida após retomada da irrigação.

A análise de variância (Tabela 9) para as variáveis de qualidade fisiológica, Teor Relativo de Água (TRA), Sólidos Solúveis (°Brix) e Acidez Titulável (AT), não revelou diferença estatística significativa ($p > 0,05$) entre faixas de potencial matricial do experimento I.

Contudo, a análise das tendências numéricas dos dados permite inferir sobre as respostas da cultura ao estresse hídrico imposto. A tendência mais notável foi observada nos Sólidos Solúveis (°Brix). Os menores teores ocorreram no tratamento mais úmido, T1 (12,63 °Brix), e as maiores concentrações nos tratamentos sob menor disponibilidade de água, T4 (15,10 °Brix)

e T5 (14,05 °Brix). Este aumento nos teores de °Brix com o aumento da restrição hídrica sugere um mecanismo de ajuste osmótico, no qual a planta acumula solutos como forma de aclimação e proteção em condições de estresse hídrico.

Tabela 9. Análise de variância (ANOVA) para variáveis Teor Relativo de Água (TRA), Sólidos Solúveis (°Brix) e Acidez Titulável (AT), sob faixas de potencial matricial.

Quadro da análise de variância				
Fonte de Variação		Teor de água na folha (%)	Sólidos solúveis (°brix)	Acidez titulável (% de ácido cítrico)
	GL	QM ^{ns}	QM ^{ns}	QM ^{ns}
Tratamento	4	0,0148	4,6938	0,003212
Bloco	5	0,0022	17,3256	0,015925
Resíduo	20	0,1816	3,4304	0,034524
CV		12,44 %	13,38 %	16,91%

*GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; CV: coeficiente de variação; ns: não significativo; *: significativo a 5% de probabilidade. **: significativo a 1% de probabilidade.

Resultados similares foram reportados por Silva et al., (2019) que, ao submeter beterraba a lâminas de irrigação de 50%, 100% e 150% da ETc e a níveis de salinidade de 2,12; 4,12 e 6,12 dS m⁻¹, observaram elevação proporcional nos teores de °Brix. Esse padrão que se mostrou consistente tanto para o estresse hídrico (presente estudo) quanto para o estresse osmótico, indicando tratar-se de uma resposta fisiológica compensatória comum a diferentes tipos de estresse abiótico.

Para o Experimento 2, a dinâmica da umidade do solo para o Experimento 2, ilustrada na Figura 13, demonstra a eficácia do manejo por faixas. Conforme planejado, após cada evento de irrigação, o conteúdo de água no solo era elevado para um nível próximo ao da capacidade de campo (linha preta, correspondente a $\theta \approx 0,205 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). A partir daí, o armazenamento de água decrescia devido à demanda evapotranspirativa da cultura, e uma nova irrigação era realizada somente quando o monitoramento indicava que o limiar inferior de potencial matricial, predefinido para cada tratamento, havia sido alcançado.

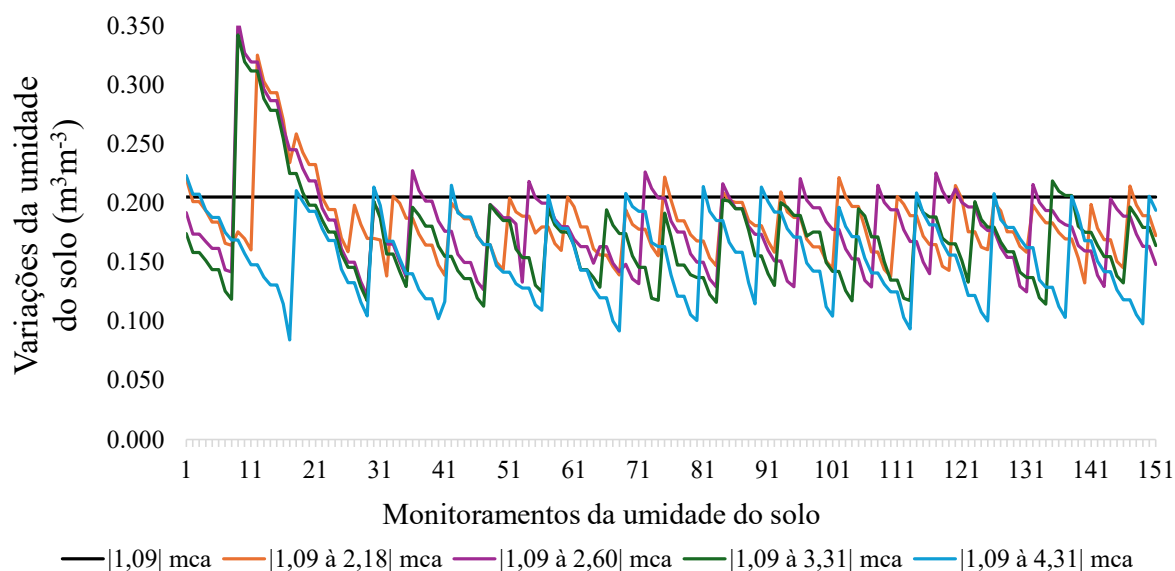


Figura 13 - Variações no conteúdo de água no solo no experimento 2.

A variação da umidade do solo ao longo do ciclo no experimento 2 (Tabela 6) foi coerente com os potenciais matriciais predefinidos para cada tratamento. O monitoramento diário da umidade, realizado ao longo do ciclo experimental, permitiu a determinação precisa das faixas reais de potencial matricial em que cada tratamento efetivamente operou: T1 (-1,09 a -1,57 mca), T2 (-1,09 a -2,18 mca), T3 (-1,09 a -2,60 mca), T4 (-1,09 a -3,31 mca) e T5 (-1,09 a -4,31 mca).

Essa dinâmica hídrica teve influência direta sobre a lâmina de água aplicada (LA) e a evapotranspiração acumulada da cultura (ETc) (Figura 14), afetando também os indicadores de eficiência de irrigação (EI) e eficiência de uso da água (EUA) discutidos a seguir (Figura 20).

Para o Experimento 2, a análise do balanço hídrico (Figura 14) revelou que o tratamento T1, que operou com o maior volume de água no solo, demandou a maior frequência de irrigações, com um intervalo médio de apenas 2,1 dias entre os 28 eventos de rega. Isso resultou na maior lâmina de água aplicada (LA) do experimento (81,32 mm), com uma lâmina média por evento de 2,90 mm. Este volume foi superior à sua evapotranspiração (ETc) de 77,85 mm, resultando em uma condição de maior disponibilidade de água em relação à demanda da cultura e gerando o maior volume drenado (4,43 mm).

O tratamento T2, com 18 eventos de rega, apresentou um intervalo maior entre as regas (3,2 dias), aplicando uma lâmina média de 3,97 mm por evento, também operou com uma maior disponibilidade de água em relação à demanda, recebendo uma lâmina de 71,44 mm para uma ETc de 70,53 mm, com 2,69 mm de dreno. Já em T3 o manejo que promoveu o maior equilíbrio entre a água aplicada e a consumida foi o T3. Neste tratamento, o intervalo entre as 14 irrigações

foi de 4,1 dias, com uma lâmina média de 4,67 mm por evento, resultando em uma lâmina total aplicada (65,36 mm) quase idêntica à demanda da ETc (65,84 mm).

Nos tratamentos com potenciais matriciais inferiores por faixa de tratamentos mais negativos, T4 e T5, os intervalos entre as irrigações foram ainda maiores. O tratamento T4, com 15 eventos de rega, foi irrigado em média a cada 3,9 dias, aplicando uma lâmina de 5,22 mm por evento, o que resultou em uma lâmina total (78,28 mm) que superou sua ETc (75,59 mm). Em contraste, o tratamento T5, com o menor número de irrigações (12 eventos), apresentou o maior intervalo médio entre as regas (4,8 dias) e a maior lâmina aplicada por evento (6,46 mm).

Apesar da maior lâmina por evento, o T5 foi o tratamento que resultou na maior diferença negativa entre a água consumida e a aplicada, com uma ETc (83,32 mm) superando a LA (77,52 mm). A necessidade de repor um volume de água tão elevado a cada irrigação reflete duas condições: o maior tempo decorrido entre os eventos de rega e, provavelmente, a maior energia despendida pelas plantas para extrair água do solo quando este se encontra em um potencial matricial mais negativo

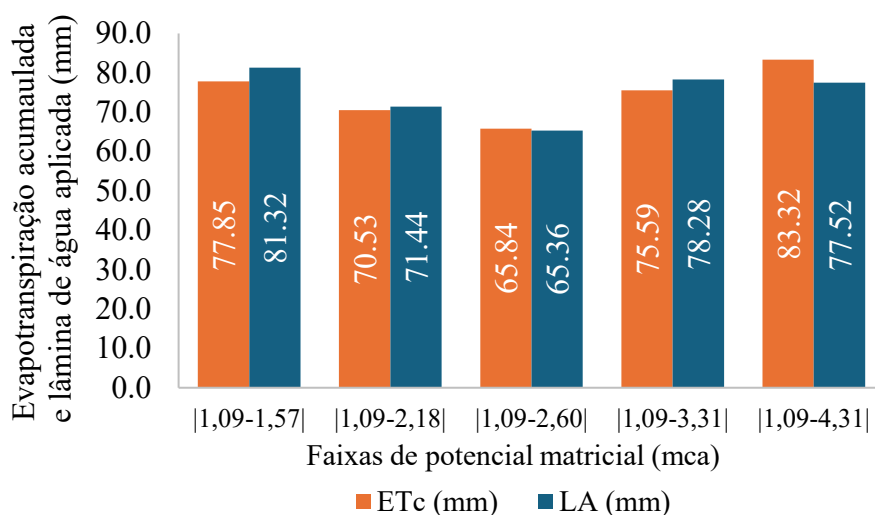


Figura 14 - Evapotranspiração acumulada (ETc) e lâmina de água aplicado (LA) a beterraba.

O manejo por potencial matricial permite um ajuste fino da lâmina de água às condições edafoclimáticas e à demanda da cultura, de forma análoga aos métodos baseados em dados micrometeorológicos. Neste contexto, os resultados obtidos se alinham parcialmente com os de Paiva et al. (2017), que, ao avaliarem a beterraba sob lâminas baseadas na ETc, observaram a máxima produtividade com uma lâmina de aproximadamente 78 mm. No presente estudo, os tratamentos com as maiores produtividades, T1 e T2, tiveram uma ETc entre 71 e 81 mm, corroborando que este é o patamar de consumo hídrico para o máximo desempenho da cultura. Contudo, nosso estudo avança ao demonstrar, através do manejo por potencial

matricial, que mesmo dentro deste patamar de alto rendimento, é possível otimizar a eficiência hídrica, como visto no desempenho superior do tratamento T2 em relação ao T1 em indicadores como a produtividade da água.

Neste contexto, A análise dos indicadores de eficiência hídrica para o Experimento 2 revelou a alta performance do manejo adotado (Figura 15). A Eficiência da Irrigação (EI) foi excelente em todos os tratamentos, com valores consistentemente acima de 94%. Observou-se uma leve tendência de aumento da EI com o aumento do estresse hídrico, atingindo o valor máximo de 98,11% em T5, o que confirma a precisão do sistema de gotejamento em aplicar a água na zona radicular com perdas mínimas.

Para a Eficiência de Uso da Água (EUA), os resultados indicam que os tratamentos T2 e T3 apresentaram os valores mais elevados (98,73% e 99,27%, respectivamente) antes de a cultura atingir o consumo total da água aplicada. No tratamento T5, a EUA atingiu o valor máximo de 100%, o que, neste contexto, deve ser interpretado como um indicador de que a demanda evapotranspirativa da cultura superou a lâmina aplicada, caracterizando a condição de maior déficit hídrico, neste caso de cerca de 7%. Portanto, os tratamentos T2 e T3 representam a faixa de maior eficiência prática, onde a demanda da planta foi atendida com o máximo de aproveitamento.

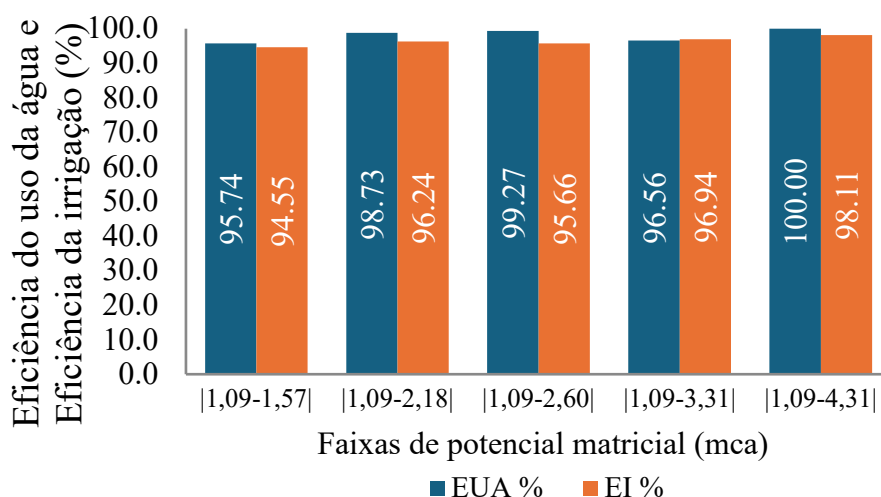


Figura 15 - Eficiência do uso da água e Eficiência de irrigação da beterraba maravilha.

Esses resultados também indicam que, apesar da eficiência operacional do sistema, a restrição hídrica imposta pelos níveis de tensão mais elevados, pode ter limitado a absorção da água pela planta. Isso ocorre porque a água se encontra sob potencial mátrico mais negativo, exigindo maior esforço para ser absorvida, o que reduz sua disponibilidade.

As faixas de potencial matricial influenciaram significativamente o desenvolvimento vegetativo da beterraba Maravilha (Tabela 10), afetando o número de folhas, a altura, o comprimento e a largura foliar, além da área foliar por planta (teste Tukey, $p \leq 0,01$).

Tabela 10. Análise de variância (ANOVA) para variáveis morfológicas da beterraba Maravilha sob diferentes tensões de água no solo.

Quadro da análise de variância						
Fonte de Variação	GL	Número de Folhas	Altura de Folha	Comprimento de folha	Largura de folha	Área foliar por planta
		QM **	QM **	QM**	QM**	QM**
Tratamento	4	1.28333	25.3627	7.9034	4.4761	174431
Bloco	5	0.32	6.3988	2.1378	1.2308	103291
Resíduo	20	0.20333	1.1644	0.5184	0.3968	13402
CV		3,78%	6,38%	4,30%	6,41%	19,17%

De modo geral, observou-se um decréscimo em todas as variáveis da parte aérea à medida que o limite inferior de tensão de água no solo se tornava mais negativo (Figura 16 a-d). Para o número de folhas (Figura 16a), os tratamentos T1 e T2 não diferiram estatisticamente, com médias de 6,83 e 6,50 folhas, respectivamente. Houve uma redução significativa a partir do tratamento T3 (6,00 folhas), atingindo o menor valor em T5 (5,67 folhas), que diferiu estatisticamente de T1.

A altura de folha foi significativamente influenciada pelos tratamentos (Figura 16b). Observou-se uma tendência de decréscimo na altura com o aumento do estresse hídrico, variando de 31,26 cm no tratamento T1 (-1,09 a -1,57 mca) até o menor valor de 26,01 cm em T5 (-1,09 a -4,31 mca). Conforme o teste de Tukey, a média de T1 não diferiu estatisticamente de T2 (29,71 cm), mas foi superior aos demais tratamentos. O tratamento T5, por sua vez, apresentou a menor altura, sendo estatisticamente inferior aos tratamentos T1, T2 e T3.

Comportamento semelhante foi observado para comprimento (18,32, 17,41 e 16,33 cm) estatisticamente iguais em T1, T2 e T3 com respectivamente e (16,65 e 15,36 cm) nas faixas T4(1,09-3,31 mca) e T5 (1,09-4,31 mca) também estatisticamente iguais (Figura 16c). Quanto a largura de folhas estatisticamente iguais T1 e T2 (11,13; 10,19 e cm), as faixas T3 (-1,09 a 2,60 mca) 9,57 cm e em T4 (-1,09 a -3,31 mca) 9,36 cm compuseram um segundo agrupamento. O menor valor foi registrado na faixa de T5(-1,09 a -4,31 mca), com 8,90 cm, estatisticamente inferior às demais (Figura 16d).

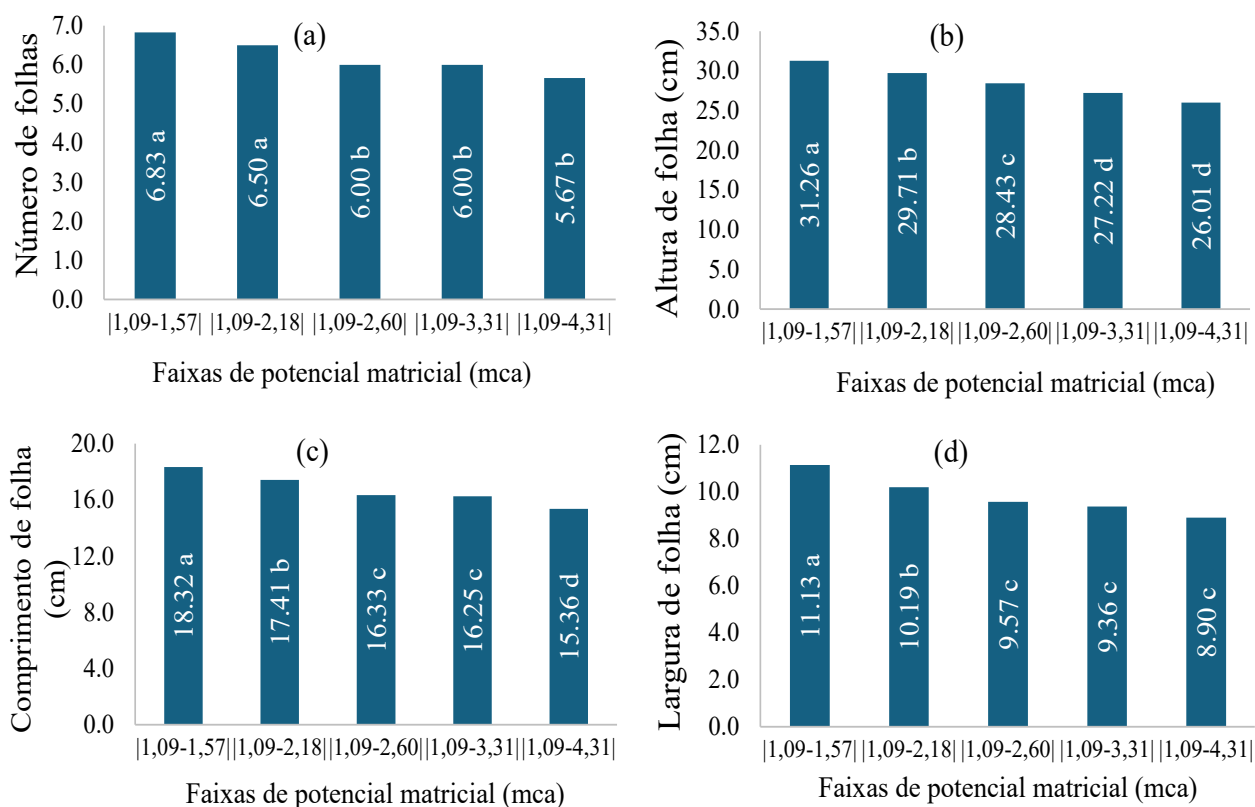


Figura 16 (a) Número de folhas por planta; (b) Altura de folhas (limbo e pecíolo) em cm; (c) Comprimento de folhas (limbo) em cm; e (d) Largura de folhas em cm.

Dentre as variáveis morfológicas, a área foliar por planta foi a que demonstrou a maior variação foi observada (Figura 17). Os tratamentos com maior disponibilidade de água, T1 (1.177,97 cm²) e T2 (1.192,96 cm²), não diferiram estatisticamente entre si e registraram as maiores médias de área foliar. A partir do tratamento T3 (1.012,98 cm²), iniciou-se uma queda, com as menores áreas sendo observadas nos tratamentos T4 (886,19 cm²) e T5 (774,02 cm²). A comparação com o tratamento de maior desenvolvimento (T2) revela reduções na área foliar de 25,7% em T4 e de 35,1% em T5.

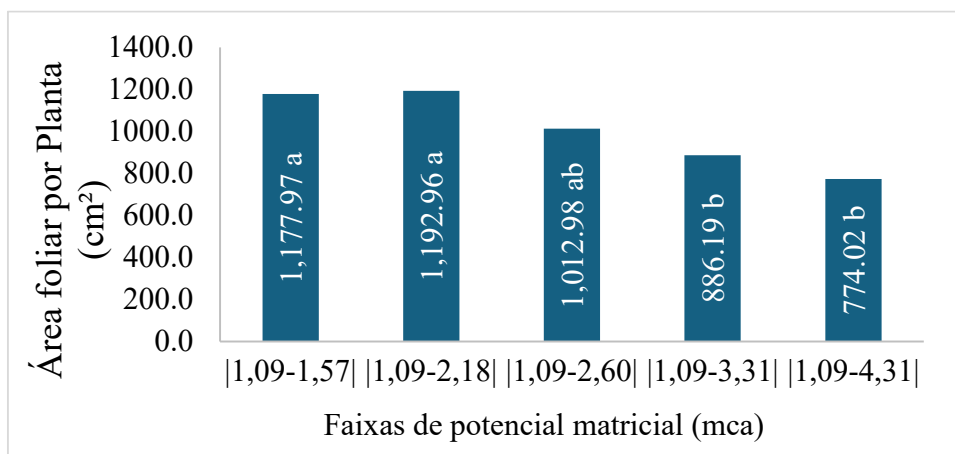


Figura 17 – Área foliar por planta, pelo método de discos em cm².

A redução da área foliar nos tratamentos com faixas de potencias mais negativas, T4 e T5, é um reflexo direto do efeito do estresse hídrico prolongado. Fisiologicamente, o déficit de água no solo induz o fechamento estomático e limita a expansão celular, comprometendo a formação do limbo foliar (TAIZ et al., 2017). T4 (-1,09 a 3,31 mca) e T5 (-1,09 a -4,31 mca) reflete o efeito do estresse hídrico prolongado. Estes mecanismos explicam os decréscimos observados. Ribeiro et al. (2024), ao aplicarem um déficit hídrico severo em beterraba (50% da ETc), verificaram uma redução de 45,27% na área foliar, uma magnitude de perda similar à observada no presente estudo, a menor disponibilidade de água no solo resultou nos maiores decréscimos na área foliar e no desenvolvimento da parte aérea da cultivar ‘Maravilha’.

A Tabela 11 apresenta a análise de variância para as variáveis de produtividade. Os resultados indicam que as diferentes faixas de potencial matricial influenciaram de forma significativa ($p < 0,01$) a produtividade total, a produtividade comercial e a Produtividade da Água Comercial (PAC). Em contrapartida, a fração comercial de raízes não apresentou diferença estatística significativa entre os tratamentos ($p > 0,05$). O baixo coeficiente de variação (CV) para a maioria das variáveis indica uma boa precisão experimental.

Tabela 11. Análise de variância (ANOVA) para variáveis produtividade total e comercial de raízes, produtividade da água comercial, e fração comercial de raízes de beterraba Maravilha.

Quadro da análise de variância					
Fonte de Variação		Produtividade Total (t ha ⁻¹)	Produtividade Comercial (t ha ⁻¹)	Produtividade da Água Comercial (t ha ⁻¹ mm ⁻³)	Fração Comercial de Raízes (%)
GL		QM **	QM **	QM **	QM ^{ns}
Tratamento	4	43.937	107.379	0.0113689	196.079
Bloco	5	2.648	38.718	0.0003561	98.430
Resíduo	20	7.402	34.226	0.0011954	97.193
CV		11,48 %	26,41 %	26,97%	27,76 %

** significativo a 1 % de probabilidade; ns = não significativo.

No Experimento 2, a produtividade também foi significativamente influenciada pelos tratamentos (Tabela 11). Os tratamentos com maior disponibilidade hídrica, T1 e T2, foram estatisticamente superiores aos demais e iguais entre si, alcançando as maiores produtividades totais (27,17 e 25,74 t ha⁻¹) e comerciais (20,63 e 19,66 t ha⁻¹), respectivamente, (Figura 18a e 18b). Em contraste com os tratamentos de maior rendimento, os tratamentos com limite inferior a partir de -2,60 mca (T3, T4 e T5) apresentaram uma queda significativa na produtividade, formando um grupo estatisticamente inferior. Nestes tratamentos, a produtividade total variou de 23,22 t ha⁻¹ (em T3) a 20,90 t ha⁻¹ (em T5). O impacto do estresse hídrico foi ainda maior na produtividade comercial, que decresceu de 16,36 t ha⁻¹ em T3 para apenas 10,78 t ha⁻¹ em T5, o valor mais baixo de todo o experimento (Figura 18a-b).

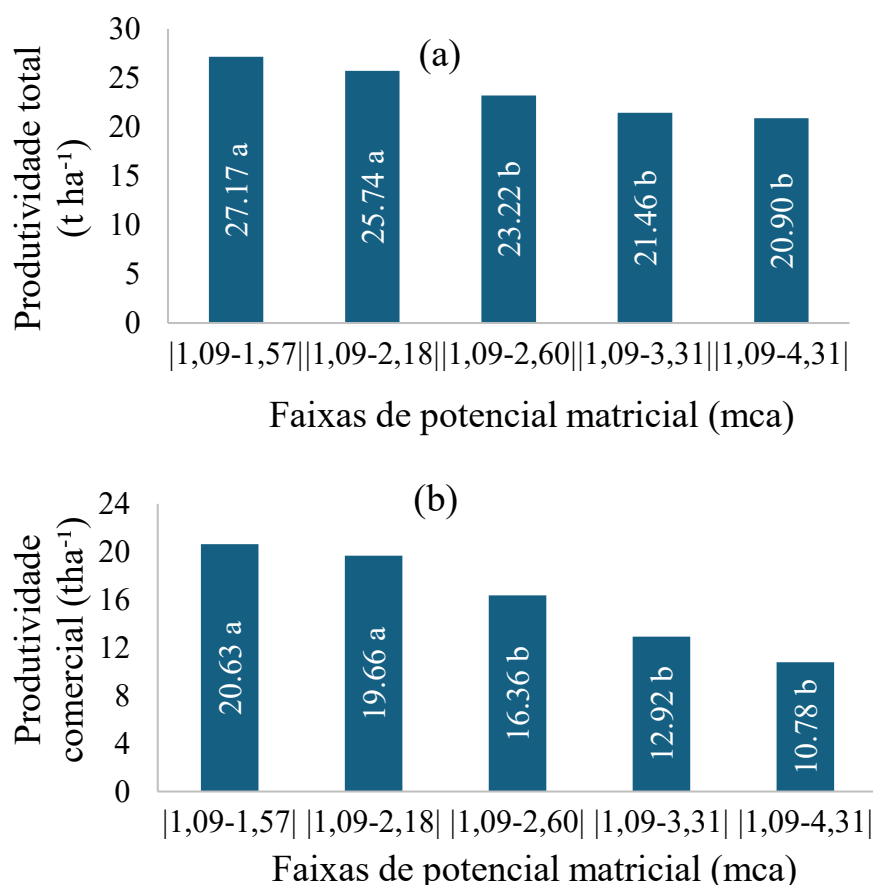


Figura 18 (a) Produtividade total da beterraba 'Maravilha' sob tesões de água no solo; **(b)** Produtividade comercial da beterraba 'Maravilha' sob tesões de água no solo.

Tomando como referência o preço médio de R\$ 3,50 kg⁻¹ (CEAGESP, 12 maio 2025), a perda de produtividade comercial de 7,71 t ha⁻¹ em T4 e de 9,85 t ha⁻¹ em T5 corresponderia a uma redução de receita de R\$ 26.985 e R\$ 34.475 por hectare, respectivamente, em comparação com o tratamento T1. Fisiologicamente, pode estar associado ao aumento da energia requerida pelas raízes para absorver água em potenciais matriciais mais negativos, que compromete processos como a expansão celular, taxa fotossintética e a translocação de fotoassimilados para os órgãos de reserva (TAIZ et al., 2017; CHAVES et al., 2009).

Embora a fração de raízes não comerciais não tenha apresentado diferença estatística significativa entre os tratamentos ($p > 0,05$), conforme demonstrado pelo teste de Tukey (Tabela 11), observou-se uma clara tendência numérica associada aos diferentes regimes hídricos. Nos tratamentos com maior restrição hídrica T5 e T4, foi registrada a menor porcentagem de raízes não comerciais (50,45% e 58,53%, respectivamente). Já nos tratamentos com maior disponibilidade de água no solo, T1 e T2, apresentaram a menor proporção de descarte (74,99% e 76,36%). Esses resultados reforçam a importância de um manejo de umidade do solo rigoroso para garantir atributos visuais e comerciais exigidos pelo mercado consumidor (Marouelli et

al., 2011). De forma consistente, Duarte et al. (2017) também relatam que maiores déficits hídricos aumentam a proporção de raízes descartadas, corroborando nossos achados.

O manejo hídrico também demonstrou um efeito significativo sobre a Produtividade da Água (PA), reforçando o impacto do estresse na eficiência produtiva da cultura (Tabela 11). Conforme a Figura 19, os tratamentos com maior disponibilidade hídrica, T1 ($0,378 \text{ t ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), T2 ($0,335 \text{ t ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) e T3 ($0,339 \text{ t ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), apresentaram os maiores valores de PA, sendo estatisticamente superiores aos tratamentos sob maior restrição. As faixas de tensão mais negativas, T4 e T5, resultaram nos menores valores de PA, com $0,265$ e $0,271 \text{ t ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, respectivamente. Este resultado indica que, para a cultivar ‘Maravilha’ nestas condições, a otimização da PA está diretamente ligada à disponibilidade de água no solo. Logo, a eficiência hídrica não aumenta proporcionalmente ao volume aplicado: quanto maior o estresse, menor o retorno produtivo por unidade de água.

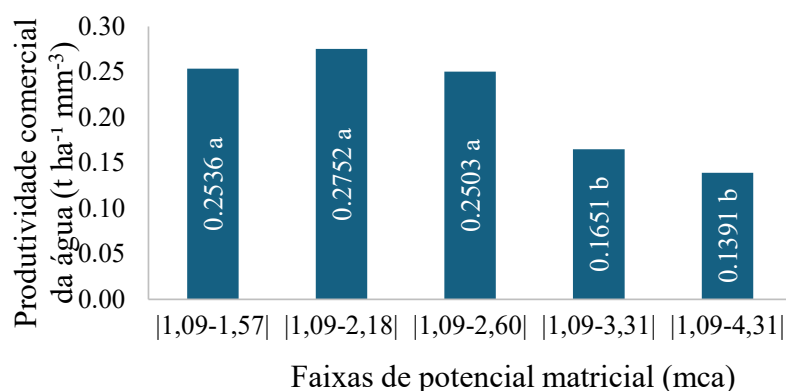


Figura 19 - Produtividade da água de irrigação da beterraba maravilha.

Adicionalmente, as variáveis fisiológicas e de qualidade, teor de água nas folhas, sólidos solúveis totais ($^{\circ}\text{Brix}$) e acidez titulável, não apresentaram diferenças estatísticas entre os tratamentos (Tabela 12).

Tabela 12 - Análise de variância (ANOVA) para variáveis Teor Relativo de Água (TRA), Sólidos Solúveis ($^{\circ}\text{Brix}$) e Acidez Titulável (AT), sob faixas de potencial matricial.

Quadro da análise de variância				
Fonte de Variação		Teor de água na folha (%)	Sólidos solúveis ($^{\circ}\text{brix}$)	Acidez titulável (% de ácido cítrico)
	GL	QM ^{ns}	QM ^{ns}	QM ^{ns}
Tratamento	4	0.0039269	0.03415	6.3388
Bloco	5	0.0129158	0.84338	4.5341
Resíduo	20	0.0028091	0.04523	3.9466
CV		6,77 %	16,06 %	15,20 %

*GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; CV: coeficiente de variação; ns: não significativo; *: significativo a 5% de probabilidade. **: significativo a 1% de probabilidade.

No teor de água na folha, observou-se o maior valor (82,68%) na faixa de menor tensão T1, com queda progressiva com o aumento da tensão, chegando a 76,25% na faixa de T2, porém ficou próximo as faixas mais negativas. Essa redução sugere uma diminuição na capacidade da planta de manter água na folha à medida que o solo se torna mais seco, refletindo um possível fechamento estomático e menor turgescência foliar, à medida que o solo se torna mais seco.

Para Sólidos Solúveis Totais (°Brix), os menores teores foram registrados nos tratamentos com maior disponibilidade hídrica, T1 (12,15 °Brix) e T2 (12,20 °Brix). Em contraste, as maiores concentrações de açúcares ocorreram em faixas de estresse hídrico intermediário a alto, com destaque para T3 (14,40 °Brix) e T5 (13,92 °Brix). Este aumento nos teores de °Brix com o aumento da restrição hídrica corrobora a hipótese de que a planta estimula o acúmulo de solutos como um mecanismo de ajuste osmótico e defesa. Este comportamento é consistente com o reportado por Chaves et al. (2009), que observaram o acúmulo de açúcares em videiras sob déficit hídrico.

A Acidez Titulável (AT) permaneceu relativamente estável entre os tratamentos, sem apresentar diferença estatística significativa (Tabela 12). Os valores variaram de um mínimo de 1,25% de ácido cítrico (em T1 e T4) a um máximo de 1,41% (em T2), não sendo observada uma tendência clara de aumento ou diminuição em resposta ao estresse hídrico (Figura 20c) . Embora não expresso de forma significativa neste estudo, a literatura aponta que o estresse hídrico pode, em algumas culturas, intensificar a produção de compostos secundários como mecanismo de defesa, o que poderia influenciar a acidez, conforme observado por Silva et al. (2015) em alface, em trabalho com alface cultivada sob estresse hídrico.

A Tensão de Água na Folha (TA) foi avaliada para compreender a resposta fisiológica da cultura às diferentes faixas de umidade (Figura 20). Nas medições realizadas 24 horas após a irrigação (06:00h), em condição de baixo estresse evaporativo, observou-se uma clara tendência: à medida que a disponibilidade de água no solo diminuía (de T1 para T5), a tensão na folha aumentava, indicando que a planta precisava exercer mais força para absorver água.

Essa tendência é confirmada pelos valores médios. Os tratamentos com maior umidade no solo, T1 (57,12 mca), T2 (79,56 mca) e T3 (85,68 mca), registraram os menores valores de TA, indicando as melhores condições hídricas foliares. Em contrapartida, os tratamentos T4 (93,84 mca) e T5 (89,76 mca) apresentaram os valores mais elevados, refletindo o maior esforço da planta para manter seu estado hídrico em condições de solo mais seco. Embora esse valor não represente uma elevação brusca, indica tendência de aumento nas faixas com tensões inferiores mais negativas mesmo nas primeiras horas do dia.

Conforme esperado, trinta horas após a irrigação (12:00h), a Tensão de Água na Folha (TA) tornou-se mais negativa em todos os tratamentos, refletindo o aumento da demanda evaporativa sob maior incidência solar (Figura 20). A resposta das plantas foi diretamente proporcional ao estresse hídrico imposto por cada tratamento. Os maiores valores de TA, indicando maior estresse, foram observados nos tratamentos com menor disponibilidade de água no solo: T5 (201,96 mca) e T4 (174,42 mca). Em contraste, as menores médias foram registradas nos tratamentos mais úmidos, T1 (123,42 mca) e T2 (135,66 mca). Este resultado indica que as plantas sob condições hídricas mais favoráveis conseguem manter seu equilíbrio hídrico por mais tempo, mesmo sob alta demanda atmosférica.

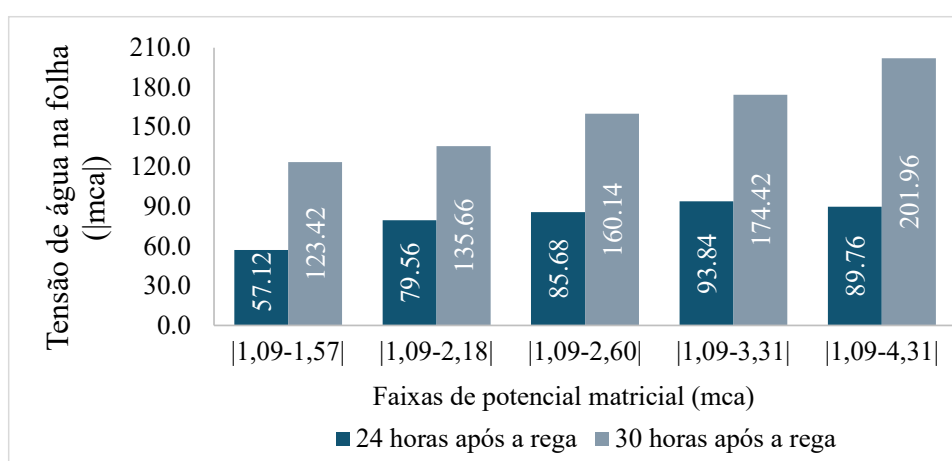


Figura 20- Tensão de água na folha 24 e 30 horas após a rega.

A análise da variação diária da TA (ΔTA), calculada pela diferença entre as medições de 30 e 24 horas após a rega, revelou como cada tratamento respondeu ao aumento da demanda evaporativa. Os tratamentos sob maior estresse hídrico, T5 e T4, apresentaram as maiores variações diárias, com deltas de 112,20 mca e 80,58 mca, respectivamente. Já os menores deltas foram observados nos tratamentos mais úmidos, T1 (66,30 mca) e T2 (56,10 mca). Esta maior amplitude de variação nos tratamentos mais secos sugere que, com menor disponibilidade de água no solo, a planta tem maior dificuldade em regular seu estado hídrico interno, provavelmente devido a uma limitação na capacidade de absorção e translocação de água para compensar as perdas por transpiração.

A utilidade da Tensão de Água na Folha (TA) como um indicador de estresse hídrico, conforme observado neste estudo, está em consonância com a literatura. Mohammadi-Ahmadmahmoudi et al. (2020) Em estudo conduzido com hortaliças em ambiente protegido, também demonstraram a elevação da TA sob estresse e sua recuperação após a irrigação, validando sua aplicação no monitoramento fisiológico. De forma integrada, os resultados agrônômicos e fisiológicos aqui apresentados indicam que o manejo ideal da irrigação para a

beterraba ‘Maravilha’ deve assegurar um suprimento hídrico que mantenha o bom estado hídrico da planta, sem comprometer o desempenho produtivo.

4. CONCLUSÃO

As faixas de potencial matricial entre -0,5 a 0,55 e -1,09 a -2,18 mca, apresentam os maiores valores de área foliar, produtividade total e produtividade comercial, mantendo o solo sempre em condições de água facilmente disponível.

Pensando em eficiência de uso da água e uma produtividade comercial dentro da média nacional para cultivares de beterraba a faixa de potencial de água no solo (-1,09 a -2,6 mca), é uma alternativa aos irrigantes da cultura.

Dessa forma, a adoção de faixas de tensão entre -1,0 e -2,18 mca é indicada como intervalo ideal para o manejo da irrigação na cultura da beterraba Maravilha proporcionando máxima produtividade, isso proporciona um fator de depleção de 0,3520. Em condições em que se deseja permitir maior estresse para as plantas e ainda assim está dentro da média nacional o fator de depleção indicado é de 0,4140.

5. REFERÊNCIAS

- ALLAN, R. G.; PERERRA, L. S.; RAES, D.; & SMITH M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 1998. https://www.researchgate.net/publication/235704197_Crop_evapotranspiration-Guidelines_for_computing_crop_water_requirements-FAO_Irrigation_and_drainage_paper_56.
- AZEVEDO, A.T., COELHO, R.D. & BARROS, T.H.d. **Productivity and quality of beet (*Beta vulgaris* L.) under different drip irrigation management methodologies**. Irrigation Science, p. 1-14, 2025. DOI:10.1007/s00271-025-01004-1.
- BARRS, H. D.; WEATHERLEY, P. E. **A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves**. Australian journal of biological sciences, v. 15, n. 3, p. 413-428, 1962. DOI:10.1071/BI9620413.
- BODNER, G.; ALSALEM, M. **O padrão de enraizamento da beterraba sacarina media as respostas estomáticas e de transpiração ao estresse hídrico progressivo**. Agronomy 2023, 13, 2519. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102519>.
- CHAVES M. M.; FLEXAS, J; PINHEIRO. C. **Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell**. Annals of Botany, v. 103, p. 551–560, 2009. DOI:10.1093/aob/mcn125.
- COELHO, E. F.; SILVA, A. J. P. da; MAROUELLI, W. A.; COSTA, F. da S. **Manejo da água de irrigação**. In: COELHO, E. F.; SILVA et al. (org.). **Irrigação da bananeira**. Brasília, DF: Embrapa, 2012. Cap. 4. p. 127–165. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/951586>. Acesso em: 18 ago. 2023.
- DEHGHANIPOUR, A, H.; SCHOUPS, G.; ZAHABIYOUN, B.; BABAZADEH, H. **Meeting agricultural and environmental water demand in endorheic irrigated river basins: A simulation-optimization approach applied to the Urmia Lake basin in Iran**. Agricultural Water Management, v. 241, p. 106353, 2020. DOI:10.1016/j.agwat.2020.106353.
- DOMÍNGUEZ-NIÑO, J. M.; OLIVER-MANERA, J.; GIRONA, J.; CASADESÚS, J. **Differential irrigation scheduling by an automated algorithm of water balance tuned by capacitance-type soil moisture sensors**. Agricultural Water Management, v. 228, p. 105880, 2020. DOI:10.1016/j.agwat.2019.105880.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 144 p. (Irrigation and Drainage Paper, 24). Disponível em: <https://www.fao.org/3/s2022e/s2022e.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2024.
- GUIMARÃES, M. J. M.; LOPES, I.; OLDONI, H.; COELHO Filho, M. A. **Balanço hídrico para diferentes regimes pluviométricos na região de Cruz das Almas BA**. Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences, v. 59, n. 3, p. 252-258, 2016. DOI: 10.4322/rca.2205.
- FERNANDES, J. E.; ALCON, F.; DIAZ-ESPEJO, A.; HERNANDEZ-SANTANA, V.; CUEVAS, M. V. **Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard**. Agricultural Water Management, v. 237, p.1-13, 2020. DOI:10.1016/j.agwat.2020.106074.

FREITAS, W. A. D., CARVALHO, J. D. A., BRAGA, R. A., & DE ANDRADE, M. J. **Irrigation scheduling using alternative soil moisture sensor.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 16, 268-274. 2012. DOI:[10.1590/S1415-43662012000300006](https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000300006).

FRIZZONE, José Antonio. **Desempenho da microirrigação.** In: FRIZZONE, José Antonio. Microirrigação: gotejamento e microaspersão. Maringá-Paraná: Eduem - Editora da Universidade Estadual de Maringá, 2012. p.97-137.

IBGE, Base de dados dos produtos: **Produção agropecuária beterraba.** 2017 Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/beterraba/br>. Acesso em: 20 de maio de 2024.

KAYA G.; ERGIN N. **Classification of red beet and sugar beet for drought tolerance using morpho-physiological and stomatal traits.** PeerJ. 2025 Mar 21;13:e19133. doi:10.7717/peerj.19133.

MAROUELLI, W. A. **Tensiômetros para o controle de irrigação em hortaliças.** Embrapa Hortaliças, Brasília, Issn 1415-3033. Circular Técnica. n. 57, 2008. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/780870/4/ct57.pdf>. Acesso em: 16 julho 2024.

MAROUELLI, W. A.; OLIVEIRA, A. S.; COELHO, E. F.; NOGUEIRA, L. C. SOUSA, V. F. **Manejo da água de irrigação.** In: SOUSA, V. F.; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. (Ed.). Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, Cap. 5, p. 158-232. 2011. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/915574>.

MIRANDA, J, R.; PEREIRA, G, M. **Cultivo da beterraba sob diferentes tensões de água no solo.** Irriga, v. 24, n. 2, p. 220-235, 2019. DOI: [10.15809/irriga.2019v24n2p220-235](https://doi.org/10.15809/irriga.2019v24n2p220-235).

MOHAMMADI-AHMADMAHMOUDI, E.; DEIHIMFARD, R.; NOORI, O. **Yield gap analysis simulated for sugar beet-growing areas in water-limited environments.** European Journal of Agronomy, v. 113, p. 125988, 2020. DOI:[10.1016/j.eja.2019.125988](https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125988).

LIANG, X.; LIAKOS, V.; WENDROTH, O.; VELLIDIS, G. **Scheduling irrigation using an approach based on the van Genuchten model.** Agricultural Water Management, v. 176, p. 170-179, 2016. DOI:[10.1016/j.agwat.2016.05.030](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.05.030).

NELSON, J. R.; LASCANO, R. J.; BOOKER, J. D.; ZARTMAN, R. E.; GOEBEL, T. S. **Evaluation of the precision agricultural landscape modeling system (PALMS) in the semiarid Texas Southern High Plains.** Open Journal of Soil Science, Vol.3 No.4 Article ID:34928, p.13 2013. DOI:[10.4236/ojss.2013.34020](https://doi.org/10.4236/ojss.2013.34020).

OLIVEIRA, N, L, C.; MELO W, M, M.; MOREIRA, R, A.; OLIVEIRA, E, L. **Desempenho de genótipos de beterraba de mesa em sistema orgânico no norte de minas gerais.** Revista Ciência Agrícola, v. 20, n. 2, p. 21-29, 2022. DOI: [10.28998/rca.v20i2.12397](https://doi.org/10.28998/rca.v20i2.12397).

PAIVA, P. V. V.; VALNIR JÚNIOR, M.; LIMA, L. S. de S.; ROCHA, J. P. A. Da; DEMONTIEZO, F. L. L.; ARAGÃO, M. F. **Avaliação de crescimento de cultivares de beterraba de mesa sob diferentes lâminas de irrigação.** Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v. 11, n. 2, p. 1271, ISSN 1982-7679, 2017. DOI:[10.7127/rbai.v11n200597](https://doi.org/10.7127/rbai.v11n200597).

PESSOA, T. N.; LIBARDI, P. L. **Physical-hydric properties of Oxisols as influenced by soil structure and clay mineralogy.** Catena, v. 211, p. 106009, 2022. DOI:10.1016/j.catena.2021.106009.

SCHMILDT, E. R.; OLIVEIRA, V. de S.; DOUSSEAU-ARANTES, S. **Modelagem da área foliar individual.** Brazilian Journals Editora, v. 1, ISBN: 978-65-6016-001-9. 2023. DOI:10.35587/brj.ed.0002124.

SILVA, A. J. P. da; COELHO, E. F.; COELHO FILHO, M. A. Water extraction variability in the banana root zone affects the reliability of water balance. Scientia Agricola, v. 72, n. 1, p. 1-10, 2015. DOI:10.1590/0103-9016-2014-0003.

SILVA, A. O.; SILVA, E. F. F. E.; KLAR, A. E. **Eficiência de uso da água em cultivares de beterraba submetidas a diferentes tensões da água no solo.** Water Resources and Irrigation Management-WRIM, v. 2, n. 1, p. 27-36, 2013. Disponível em: <https://www3.ufrb.edu.br/index.php/wrim/article/view/1594/828>. Acessado em: 20 Out 2024.

SILVA, A. O., SILVA, Ê. F., BASSOI, L. H., & KLAR, A. E. **Desenvolvimento de cultivares de beterraba sob diferentes tensões da água no solo.** Horticultura Brasileira, v. 33, p. 12-18, 2015. DOI:10.1590/S0102-053620150000100003.

SILVA, C. B. da; SILVA, J. C. da; SANTOS, D. P. dos; SILVA, P. F. da; BARBOSA, M. de S.; SANTOS, M. A. L. dos. **Manejo da irrigação na cultura da beterraba de mesa sob condições salinas em Alagoas.** Revista Brasileira de Agricultura Irrigada v.13, nº.2, p. 3285 - 3296, Fortaleza, CE, ISSN 1982-7679, 2019. DOI:10.7127/rbai.v13n200880.

SIMÕES, W. L.; SOUZA, M. A.; YURI, J. E.; GUIMARÃES, M. J. M.; GOMES, V. H. F. **Desempenho de cultivares de beterrabas submetidas a diferentes lâminas de irrigação no Submédio São Francisco.** Water Resources and Irrigation Management-WRIM, v. 5, n. 2, p. 51-57, 2016. <https://periodicos.ufrb.edu.br/index.php/wrim/article/view/1581/815>.

SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. T; SEJNA, M. **Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages.** Vadose Zone Journal, v. 15, n. 7, p. vzj2016. 04.0033, 2016. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.04.0033>.

STAGNARI F.; GALIENI A.; SPECA S.; PISANTE M. **Water stress effects on growth, yield and quality traits of red beet.** Scientia Horticulturae, v. 165, p. 13-22, 2014. DOI:10.1016/j.scienta.2013.10.026.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; Moller, M. I.; Murphy, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal.** 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888p

TIVELLI, S. W.; FACTOR, T. L.; TERAMOTO, J. R. S.; FABRI, E. G.; MORAES, A. R. A. de; TRANI, P. E.; MAY, A. **Beterraba: do plantio à comercialização.** Campinas: Instituto Agrônômico, v. 210, p. 45, 2011. 45p. (Série Tecnologia APTA. Boletim Técnico IAC, 210), ISSN: 1809-7936. Versão on-line: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/48016/1/Andre-May-Boletim-Tec-IAC.pdf>.

ZHANG, B.; CHANG, Y.; LI, G.; ZHANG, S.; ZHANG, P.; WANG, Z.; KONG, D. **The Effect of Irrigation and Fertilization Reduction on Yield, Quality, and Resource Use Efficiency of Drip-Fertilized Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) in Northern China.** Plants, v. 14, n. 4, p. 536, 2025. DOI:10.3390/plants14040536.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adoção de um fator de depleção em torno de 0,37 a 0,41 para a cultura da beterraba pode servir como referência prática para projetos de irrigação localizados em diferentes condições de solo e com isso pode ser utilizado para definir o limite inferior para indicar o momento que deve ser feito a irrigação.

Como perspectivas futuras, sugere-se o aprofundamento dos estudos sobre o uso de faixas de potenciais matriciais em outras horticultas e cultivares de beterraba, avaliando seu desempenho sob diferentes tipos de solo, regimes climáticos, e qualidade de água distinta ampliando a aplicabilidade dos resultados obtidos. Adicionalmente, análises econômicas mais detalhadas, especialmente em regiões onde o custo da água ou da energia elétrica representa um entrave à produção, pode promover economias significativas, contribuir para a redução dos custos operacionais e aumento do retorno financeiro ao produtor, além de contribuir com o uso racional da água na agricultura, podem subsidiar decisões técnicas mais precisas em nível produtivo.