

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**Modelagem da evapotranspiração e coeficientes de cultura para beterraba**

Laylton de Albuquerque Santos  
*Doctor Scientiae*

**VIÇOSA - MINAS GERAIS**  
**2025**

**LAYLTON DE ALBUQUERQUE SANTOS**

**Modelagem da evapotranspiração e coeficientes de cultura para beterraba**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientadora: Catariny C. Aleman Pina

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S237m  
2025 Santos, Laylton de Albuquerque, 1994-  
Modelagem da evapotranspiração e coeficientes de cultura  
para beterraba / Laylton de Albuquerque Santos. – Viçosa, MG,  
2025.

1 tese eletrônica (68 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Catariny Cabral Aleman.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Agrícola, 2025.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.776>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Evapotranspiração - Medição. 2. Beterraba - Efeito da  
umidade do solo - Modelos matemáticos. 3. Sensoriamento  
remoto. I. Aleman, Catariny Cabral, 1988-. II. Universidade  
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 631.57

**LAYLTON DE ALBUQUERQUE SANTOS**

**Modelagem da evapotranspiração e coeficientes de cultura para beterraba**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 25 de fevereiro de 2025.

Assentimento:

---

Laylton de Albuquerque Santos  
Autor

---

Catariny Cabral Aleman Pina  
Orientadora

Essa tese foi assinada digitalmente pelo autor em 24/11/2025 às 17:42:21 e pela orientadora em 09/12/2025 às 05:09:41. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **BGAW.VL65.SLPH** e clique no botão 'Validar documento'.

Dedico este trabalho à minha amada esposa, Joslanny H. Vieira, e ao nosso bebê, a quem aguardamos com amor e carinho, e aos meus pais, Cleonice e Francisco (*in memoriam*).

## AGRADECIMENTOS

Ao Senhor Deus, por sua glória e pela força concedida sempre, principalmente nas adversidades.

A minha amada esposa, Joslanny, agradeço de coração por toda confiança e compaixão que iluminou minha trajetória de vida.

Aos meus pais, Cleonice e Francisco (*in memoriam*), sou grato pelo esforço e dedicação que me permitiu alcançar meus objetivos.

Agradeço os meus irmãos, Lennyse, Lyd'ane e Laylson, pelo exemplo de força e amor.

Agradeço aos meus queridos amigos, Adele Cristina, Ana Isabel, Carlos Eduardo, Jeniffer Pacheco, por toda parceria e amizade que vivemos nessa etapa.

Ao meu amigo José Antônio Ferrera, obrigado por todas os ensinamentos de vida e ajuda concedida para que esse trabalho pudesse se concretizar.

A Catariny Cabral Aleman, minha orientadora, expressei todo meu agradecimento pela confiança, pelo incentivo, pelos conselhos, pela orientação, pela amizade e pelas ideias que possibilitaram o estudo.

Aos membros da banca, sou grato pelo tempo empregado e sugestões valiosas à pesquisa.

Meu agradecimento à Universidade Federal de Viçosa, aos Professores e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, que por meio da excelência disponibilizaram o conhecimento e a infraestrutura necessária para realização deste trabalho.

Agradeço a todos os funcionários da UFV, pelo carinho e dedicação que possibilita uma universidade pública e de qualidade a serviço do país.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

“Vocês nem sabem o que acontecerá amanhã! Que é a sua vida? Vocês são como a neblina que aparece por um pouco de tempo e depois se dissipa.”

Tiago 4,14

## RESUMO

SANTOS, Laylton de Albuquerque, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2025. **Modelagem da evapotranspiração e coeficientes de cultura para beterraba.** Orientadora: Catariny Cabral Aleman Pina.

Cenários de mudanças climáticas e a crescente suscetibilidade de culturas de ciclo curto reforçam a necessidade de aprimorar o manejo hídrico na agricultura, especialmente em culturas de alto valor. Assim, o objetivo dessa pesquisa foi estimar a evapotranspiração, a transpiração e a evaporação do solo na beterraba de mesa, cultivar Early Wonder (*Beta vulgaris* L.) utilizando uma abordagem combinada de modelagem matemática (SIMDualKc), medições diretas com lisímetros de drenagem e técnicas de sensoriamento remoto ativo. A pesquisa foi conduzida em múltiplos ciclos de cultivo (2021, 2022 e 2023), com experimentos em campo experimental durante o outono/inverno e em casa de vegetação durante o verão, ambos na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil. No experimento em casa de vegetação, lisímetros de drenagem foram utilizados para medir a evapotranspiração da cultura (ETc) e a transpiração da cultura (Tc), possibilitando a estimativa dos coeficientes de cultivo (Kc) e basal (Kcb) a partir da evapotranspiração de referência (ET0). A ETc da beterraba foi de 192 mm (2021) e 181 mm (2022), sendo que a evaporação do solo representou 36% (2021) e 47% (2022) do consumo hídrico total. Os valores médios estimados para o Kc foram 0,62 e 1,18, e para o Kcb foram 0,11 e 0,83, nas fases inicial e intermediária da cultura, respectivamente. As relações entre os coeficientes Kc e Kcb com a fração de cobertura do solo e os índices de vegetação por diferença normalizada mostraram forte concordância, evidenciando o potencial do sensoriamento remoto para estimar o consumo hídrico da cultura. No experimento a campo, a modelagem matemática da evapotranspiração da cultura (ETc) foi realizada com base no coeficiente duplo de cultivo, conforme o manual 56 da FAO, sob condições de irrigação plena (100% da ETc) e déficit hídrico (50% da ETc). O modelo SIMDualKc foi calibrado com dados de 2022 e validado com dados de 2023, apresentando boa precisão na estimativa da dinâmica de água no solo, avaliada por indicadores estatísticos, como o coeficiente de determinação ( $r^2$ ), o erro absoluto médio (MAE), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e a eficiência do modelo (EF). Os resultados nestas pesquisas fornecem parâmetros atualizados para a estimativa da evapotranspiração da beterraba de mesa em diferentes condições de cultivo, contribuindo para um manejo hídrico mais eficiente.

Palavras-chave: Transpiração da cultura; Evaporação do solo; Modelo SIMDualKc; Balanço hídrico do solo; Lisimetria; *Beta vulgaris* L.

## ABSTRACT

SANTOS, Laylton de Albuquerque, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2025. **Modeling of evapotranspiration and crop coefficient for beet.** Adviser: Catariny Cabral Aleman Pina.

Climate change scenarios and the increasing susceptibility of short-cycle crops reinforce the need to improve agricultural water management, particularly for high-value crops. Thus, the objective of this research was to estimate the evapotranspiration, transpiration, and soil evaporation of beetroot, cultivar 'Early Wonder' (*Beta vulgaris* L.), using a combined approach of mathematical modeling (SIMDualKc), direct measurements with drainage lysimeters, and remote sensing techniques. The research was conducted over multiple growing cycles (2021, 2022, and 2023), with experiments in an experimental field during the autumn/winter and in a greenhouse during the summer, both at the Federal University of Viçosa, Viçosa, MG, Brazil. In the protected environment experiment, drainage lysimeters were used to measure crop evapotranspiration (ET<sub>c</sub>) and transpiration (T<sub>c</sub>), enabling the estimation of the crop (K<sub>c</sub>) and basal crop (K<sub>cb</sub>) coefficients from reference evapotranspiration (ET<sub>0</sub>). The total ET<sub>c</sub> for beetroot was 192 mm (2021) and 181 mm (2022), with soil evaporation accounting for 36% (2021) and 47% (2022) of the total water consumption. The average estimated K<sub>c</sub> values were 0.62 and 1.18, and the K<sub>cb</sub> values were 0.11 and 0.83, for the initial and mid-season stages, respectively. The relationships between the K<sub>c</sub> and K<sub>cb</sub> coefficients with the soil cover fraction and the normalized difference vegetation index showed strong agreement, highlighting the potential of remote sensing to estimate the crop's water consumption. In the field experiment, mathematical modeling of ET<sub>c</sub> was performed based on the dual crop coefficient approach, as per FAO Paper 56, under conditions of full irrigation (100% of ET<sub>c</sub>) and water deficit (50% of ET<sub>c</sub>). The SIMDualKc model was calibrated using 2022 data and validated with 2023 data, demonstrating good accuracy in estimating soil water dynamics, as assessed by statistical indicators such as the coefficient of determination ( $r^2$ ), mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), and model efficiency (EF). The results from this research provide updated parameters for estimating the evapotranspiration of beetroot under different growing conditions, contributing to more efficient water management.

Keywords: Crop transpiration; Soil evaporation; SIMDualKc model; Soil water balance; Lysimetry; *Beta vulgaris* L.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### CAPÍTULO 1 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTES DE CULTIVO COM SENSORIAMENTO REMOTO PARA O CULTIVO DE BETERRABAS

<b>Figura 1.</b> Croqui com a disposição dos lisímetros e dos tratamentos que consistiram na evapotranspiração da grama (ETgrama), evapotranspiração da cultura (ETc), transpiração da cultura (Tc) e evaporação do solo (E). .....	22
<b>Figura 2.</b> Fluxograma com a metodologia usada para a determinação da fração de cobertura do solo vegetado no cultivo da beterraba, cultivar Early Wonder.....	27
<b>Figura 3.</b> Relação entre a radiação solar externa e interna da casa de vegetação utilizada no cultivo da beterraba, cultivar Early Wonder.....	29
<b>Figura 4.</b> Diferença entre a amplitude da radiação e a transmissividade da casa de vegetação. ....	29
<b>Figura 5.</b> Evapotranspiração e precipitação pluvial para os ciclos 2021 (a) e 2022 (b) de cultivo da beterraba, cultivar Early Wonder.....	31
<b>Figura 6.</b> Soma do consumo hídrico dos ciclos de cultivo para a evapotranspiração de referência por Penman-Monteith (PM), evapotranspiração da cultura (ETc), transpiração da cultura (Tc) e a evaporação do solo vegetado (Ev) para os ciclos 2021 (a) e 2022 (b).....	32
<b>Figura 7.</b> Coeficientes de cultivo (Kc), basal da cultura (Kcb) e de evaporação do solo vegetado (Kev) diários para os ciclos 2021 (a) e 2022 (b) de cultivo da beterraba, cultivar Early Wonder. ....	34
<b>Figura 8.</b> Fração média da cobertura do solo coberta por vegetação em função dos dias de cultivo para os ciclos 2021 e 2022 do cultivo da beterraba, cultivar Early Wonder. ....	37
<b>Figura 9.</b> Coeficiente de cultivo (a) e coeficiente basal da cultura (b) em função do índice vegetativo NDVI para o cultivo da beterraba, cultivar Early Wonder. ....	38
<b>Figura 10.</b> Coeficientes de cultivo (Kc) e basal da cultura (Kcb) em função da fração de cobertura do solo para o cultivo da beterraba da beterraba. ....	39

## CAPÍTULO 2 – EVAPORAÇÃO E TRANSPIRAÇÃO ESTIMADA DA BETERRABA VERMELHA USANDO O MODELO SIMDUALKC

<b>Figura 1.</b> Temperaturas máxima e mínima (°C), precipitação pluviométrica acumulada (mm) e evapotranspiração de referência (mm) durante o período de cultivo da beterraba, cultivar Early Wonder para os anos de 2022 (a) e 2023 (b).....	48
<b>Figura 2.</b> Estrutura do SIMDualKc .....	53
<b>Figura 3.</b> Variação diária dos coeficientes basal da cultura potencial ( $K_{cb}$ , —), basal da cultura real ( $K_{cb\ act}$ , —) e evaporação ( $K_e$ , — o), sob eventos de irrigações com 100% da demanda hídrica (■) e precipitações (■), para os anos de 2022 (a) e 2023 (b), para a beterraba, cultivar Early Wonder. ....	55
<b>Figura 4.</b> Variação diária dos coeficientes basal da cultura potencial ( $K_{cb}$ , —), basal da cultura real ( $K_{cb\ act}$ , —) e evaporação ( $K_e$ , — o), sob eventos de irrigações com 50% da demanda hídrica (■) e precipitações (■), para os anos de 2022 (a) e 2023 (b), para a beterraba, cultivar Early Wonder. ....	56
<b>Figura 5.</b> Variação da água disponível no solo estimada (ASW est) pelo SIMDualKc e a umidade do solo observada (ASW obs) em campo, para os anos de 2022 (a) e 2023 (b), para cultura da beterraba, cultivar Early Wonder, para o suprimento de 100% da evapotranspiração da cultura. ....	58
<b>Figura 6.</b> Variação da água disponível no solo estimada (ASW est) pelo SIMDualKc e a umidade do solo observada (ASW obs) em campo, para os anos de 2022 (a) e 2023 (b), para cultura da beterraba, cultivar Early Wonder, para o suprimento de 50% da evapotranspiração da cultura. ....	60

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 1 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTES DE CULTIVO COM SENSORIAMENTO REMOTO PARA O CULTIVO DE BETERRABAS

<b>Tabela 1.</b> Análise físico-química do solo utilizado nos lisímetros. ....	21
<b>Tabela 2.</b> Indicadores da qualidade do ajuste para o erro médio absoluto (MAE), a raiz quadrática médio do erro (RMSE), do erro de viés médio (MBE) e da eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) para os valores observados de radiação solar externa e interna da casa de vegetação (Figura 3) e da amplitude da radiação e a transmissividade da casa de vegetação (Figura 4) para a cultura da beterraba, cultivar Early Wonder. ....	30
<b>Tabela 3.</b> Indicadores da qualidade do ajuste para o erro médio absoluto (MAE), a raiz quadrática médio do erro (RMSE), do erro de viés médio (MBE) e da eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) para os valores observados e preditos do coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), coeficiente de cultivo basal de cultura ( $K_{cb}$ ) e coeficiente de evaporação do solo vegetado ( $k_{ev}$ ) para os anos de 2021 e 2022 para a cultura da beterraba, cultivar Early Wonder. ....	36

### CAPÍTULO 2 – EVAPORAÇÃO E TRANSPIRAÇÃO ESTIMADA DA BETERRABA VERMELHA USANDO O MODELO SIMDUALK<sub>C</sub>

<b>Tabela 1.</b> Data e duração dos ciclos de desenvolvimento da cultura da beterraba, cultivar Early Wonder. ....	49
<b>Tabela 2.</b> Fração média da cobertura do solo coberta por vegetação ( $f_c$ , %) em função dos dias de cultivo da beterraba, cultivar Early Wonder, para os anos de 2022 e 2023. ....	49
<b>Tabela 3.</b> Parâmetros padrão (iniciais) e calibrados usados com o modelo SIMDualK <sub>c</sub> . ....	53
<b>Tabela 4.</b> Indicadores da qualidade do ajuste do modelo para os valores de água disponível no solo observados no campo (ASW obs) e os estimados pelo modelo SIMDualK <sub>c</sub> (ASW est) fornecendo uma perspectiva sobre a interação do modelo ao gerar linhas de tendência, cultura da beterraba, cultivar Early Wonder. ....	59

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	14
<b>REFERÊNCIA</b> .....	15
<b>CAPÍTULO 1 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTES DE CULTIVO COM SENSORIAMENTO REMOTO ATIVO PARA O CULTIVO DE BETERRABAS</b> .....	17
<b>ABSTRACT</b> .....	18
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	19
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	20
<b>2.1 Área experimental</b> .....	20
<b>2.2 Procedimentos Experimentais</b> .....	21
<b>2.3 Práticas agronômicas</b> .....	22
<b>2.4 Elementos meteorológicos</b> .....	23
<b>2.5 Parâmetros estimados</b> .....	23
<b>2.5.1 Evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>)</b> .....	23
<b>2.5.2 Manejo dos lisímetros (ET)</b> .....	24
<b>2.5.3 Coeficiente da cultura único (Single K<sub>c</sub>)</b> .....	24
<b>2.5.4 Coeficiente duplo da cultura (Dual K<sub>c</sub>)</b> .....	25
<b>2.5.5 Índice de vegetação de diferença normativa (NDVI)</b> .....	25
<b>2.5.6 Fração de cobertura do solo coberta por vegetação (fc)</b> .....	26
<b>2.5.7 Análise estatística</b> .....	27
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	28
<b>3.1 Radiação solar</b> .....	28
<b>3.2 Evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>), evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) e consumo hídrico</b> .....	30
<b>3.3 Coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>), coeficiente basal da cultura (K<sub>cb</sub>) e coeficiente do solo vegetado (K<sub>ev</sub>)</b> .....	34

3.4	Fração de cobertura do solo coberta por vegetação (fc) e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) .....	36
4	CONCLUSÕES.....	40
	REFERÊNCIAS .....	41
	<b>CAPÍTULO 2 – EVAPORAÇÃO E TRANSPIRAÇÃO ESTIMADA DA BETERRABA VERMELHA USANDO O MODELO SIMDUALKC .....</b>	<b>44</b>
1	INTRODUÇÃO .....	46
2	MATERIAL E MÉTODOS .....	47
2.1	Área experimental .....	47
2.2	Condução experimental .....	48
2.3	Estimativa da lâmina de água e umidade do solo .....	50
2.4	SIMDualKc .....	52
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	55
3.1	Coefficientes e evapotranspiração .....	55
3.2	Água disponível no solo .....	58
4	CONCLUSÃO.....	61
	REFERÊNCIAS .....	61
	APÊNDICES.....	66

## INTRODUÇÃO GERAL

A irrigação desempenha um papel fundamental na agricultura global, com cerca de 20% da área cultivada mundial é irrigada (FAOSTAT, 2022). O Brasil se destaca entre os 10 países com maior extensão de área irrigada, totalizando 8,2 milhões de hectares, e com alto potencial de expansão (ANA, 2021). Este aumento de áreas irrigadas, somado aos desafios impostos pelas mudanças climáticas e ambientais, chuvas irregulares e temperaturas extremas, enfatiza a necessidade de estratégias eficientes de manejo hídrico para assegurar a capacidade da agricultura de atender às demandas alimentares de uma população global crescente.

A beterraba é uma cultura de alto valor agregado e de grande relevância econômica para o Brasil, com mais de 113 mil toneladas comercializadas nas centrais de abastecimento em 2024, concentra as maiores movimentações nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Paraná, que juntos correspondem por mais de 64% do mercado do país (CONAB, 2025). A relevância dessa cultura, combinada com os desafios do manejo hídrico, reforça a importância de estimar sua evapotranspiração de cultura (ET<sub>c</sub>) e seus respectivos coeficientes (AMARKAI; SÜHERI, 2024; WANG et al., 2021; YAMAÇ, 2021)

A evapotranspiração de cultura (ET<sub>c</sub>), que combina os processos de evaporação do solo e transpiração das plantas, é a variável central para um bom manejo hídrico (ALLEN et al., 1998; WANG et al., 2021; YAMAÇ, 2021). A FAO 56 é o documento de referência global que estabelece a metodologia padrão para o cálculo da ET<sub>c</sub>. A abordagem da FAO 56 baseia-se na integração de dados meteorológicos, que permitem o cálculo da evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>), com coeficientes de cultura (K<sub>c</sub>) específicos para cada estágio de desenvolvimento da planta (ALLEN *et al.*, 1998). Ao estimar o consumo hídrico da cultura, é possível realizar um balanço detalhado da entrada e saída de água no sistema solo-planta-atmosfera, o que fundamenta a gestão da irrigação.

O coeficiente de cultura (K<sub>c</sub>) pode ser determinado pela abordagem de coeficiente único, que representa a evapotranspiração total, ou pela abordagem de coeficiente duplo ( $K_c = K_{cb} + K_e$ ), que desagrega a transpiração da planta (K<sub>cb</sub>) da evaporação do solo (K<sub>e</sub>) (PEREIRA et al., 2021b; RAMOS et al., 2023). A precisão da ET<sub>c</sub> é ainda mais crítica em ambientes protegidos como casas de vegetação, onde a demanda hídrica depende inteiramente da irrigação.

Na modernização do manejo hídrico, aplicações do sensoriamento remoto (SR), por meio de índices espectrais, e modelos de simulações do consumo da planta tem se tornado uma ferramenta cada vez mais importante no monitoramento da agricultura. Na área de modelagem,

o SIMDualKc se destaca como uma ferramenta avançada, capaz de fornecer um balanço hídrico detalhado. Ambas vêm sendo amplamente utilizadas, especialmente na estimativa da evapotranspiração da cultura (ETc) e no apoio ao cálculo dos coeficientes de cultura (CHEN et al., 2021; DAROUICH et al., 2021; RAMOS et al., 2023; WANG et al., 2021; YAMAÇ, 2021). Apesar de diversas aplicações bem-sucedidas de SR e SIMDualKc no setor agrícola, ainda persiste uma lacuna importante de conhecimento: a correlação dos coeficientes Kc e Kcb com a Fração de Cobertura do Solo (fc) em algumas culturas, como é o caso da beterraba de mesa, conforme identificado na atualização mais recente dos coeficientes de culturas FAO56, fornecida por (PEREIRA et al., 2021a).

Nesta perspectiva, esta pesquisa foi dividida em dois capítulos. No primeiro capítulo, os objetivos foram analisar o efeito das casas de vegetação no consumo de água da beterraba, determinar os coeficientes de cultivo (Kc e Kcb) e sua relação com a cobertura do solo e índices de vegetação, além de propor estratégias para um manejo hídrico eficiente. O segundo capítulo teve como objetivo estimar a evaporação do solo e a transpiração da beterraba utilizando o modelo SIMDualKc, com base no balanço hídrico.

## REFERÊNCIA

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements** Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO. Rome: FAO, 1998.

AMARKAI, P. A.; SÜHERI, S. Comparative Evaluation of Crop Evapotranspiration Estimation Methods in a Semi-Arid Region. **Sustainability**, v. 16, n. 24, p. 11133, 19 dez. 2024.

ANA. **Atlas Irrigação 2021: Uso da Água na Agricultura Irrigada**. Brasília: ANA. Disponível em:

<[https://biblioteca.ana.gov.br/asp/download.asp?codigo=148256&tipo\\_midia=2&iIndexSrv=1&iUsuario=0&obra=88090&tipo=1&iBanner=0&iIdioma=0](https://biblioteca.ana.gov.br/asp/download.asp?codigo=148256&tipo_midia=2&iIndexSrv=1&iUsuario=0&obra=88090&tipo=1&iBanner=0&iIdioma=0)>. 2021.

CHEN, L. et al. Beetroot as a functional food with huge health benefits: Antioxidant, antitumor, physical function, and chronic metabolomics activity. **Food Science & Nutrition**, v. 9, n. 11, p. 6406–6420, 9 nov. 2021.

CONAB. **Programa Brasileiro de Modernização do Mercado Hortigranjeiro**. Disponível em: <<https://dw.ceasa.gov.br/>>.

DAROUICH, H. et al. Crop water requirements and crop coefficients for jute mallow (*Corchorus olitorius* L.) using the SIMDualKc model and assessing irrigation strategies for the Syrian Akkar region. **Agricultural Water Management**, v. 255, p. 107038, set. 2021.

FAOSTAT. **Food and agriculture data.**

PEREIRA, L. S. et al. Prediction of crop coefficients from fraction of ground cover and height: Practical application to vegetable, field and fruit crops with focus on parameterization. **Agricultural Water Management**<sup>2</sup>, v. 252, n. 106663, p. 23, 2021a.

PEREIRA, L. S. et al. Standard single and basal crop coefficients for field crops. Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method. **Agricultural Water Management**, v. 243, p. 106466, jan. 2021b.

RAMOS, T. B. et al. Water use and soil water balance of Mediterranean tree crops assessed with the SIMDualKc model in orchards of southern Portugal. **Agricultural Water Management**, v. 279, p. 108209, abr. 2023.

WANG, T. et al. Evaluation of crop coefficient and evapotranspiration data for sugar beets from landsat surface reflectances using micrometeorological measurements and weighing lysimetry. **Agricultural Water Management**, v. 244, p. 106533, fev. 2021.

YAMAÇ, S. S. Artificial intelligence methods reliably predict crop evapotranspiration with different combinations of meteorological data for sugar beet in a semiarid area. **Agricultural Water Management**, v. 254, p. 106968, ago. 2021.

## CAPÍTULO 1 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTES DE CULTIVO COM SENSORIAMENTO REMOTO ATIVO PARA O CULTIVO DE BETERRABAS

### RESUMO

A beterraba é uma cultura de significativa importância agrícola, impulsionada por seu elevado valor nutricional. Este estudo teve como objetivo determinar a evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) e transpiração da cultura (T<sub>c</sub>), estimar os coeficientes de cultivo (K<sub>c</sub>) e basal (K<sub>cb</sub>) para a cultura da beterraba Early Wonder, e monitorar a cultura usando sensoriamento remoto ativo. A pesquisa foi conduzida durante dois ciclos em diferentes anos em casa de vegetação na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. Lisímetros de drenagem foram utilizados para medir diariamente a ET<sub>c</sub> e a T<sub>c</sub> ao longo de ambos os ciclos vegetativos. Os coeficientes foram estimados usando a evapotranspiração de referência (ET<sub>0,in</sub>) pelo método de Penman-Monteith e os dados de consumo hídrico dos lisímetros. A ET<sub>0,in</sub> foi estimada por uma estação meteorológica na casa de vegetação, com valores ajustados para o ambiente com restrição de ventilação. A ET<sub>c</sub> total da beterraba foi de 192 mm (2021) e 181 mm (2022). A contribuição da evaporação do solo para o consumo total de água do lisímetro foi de 36% (2021) e 47% (2022). Os valores médios estimados para o K<sub>c</sub> foram de 0,62 e 1,18 e para o K<sub>cb</sub> foram de 0,11 e 0,83, para as fases inicial e intermediária da cultura, respectivamente. Fortes correlações foram observadas entre o coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>) e o coeficiente basal de cultivo (K<sub>cb</sub>) e variáveis como a fração de cobertura do solo pela vegetação e o índice de vegetação por diferença normalizada. Portanto, essas variáveis podem ser usadas para estimar o consumo de água da beterraba por meio de sensoriamento remoto. Os resultados deste estudo fornecem parâmetros cruciais para estimar a evapotranspiração da cultivar de beterraba 'Early Wonder' cultivada em ambiente protegido, oferecendo valores atualizados de K<sub>c</sub> e K<sub>cb</sub> e demonstrando a utilidade de técnicas de sensoriamento remoto para caracterizar as condições reais de cultivo.

Palavras-chave: Penman-Monteith. Fração de cobertura do solo. NDVI. Casa de vegetação. Dossel vegetal. *Beta vulgaris* L.

## ABSTRACT

Beetroot (*Beta vulgaris* L.) is a crop of significant agricultural importance, driven by its high nutritional value. This study aimed to determine the crop evapotranspiration (ET<sub>c</sub>) and transpiration (T), estimate the crop (K<sub>c</sub>) and basal crop (K<sub>cb</sub>) coefficients for the 'Early Wonder' beetroot cultivar, and monitor the crop using active remote sensing. The research was conducted over two growing cycles in different years within a greenhouse at the Federal University of Viçosa, Viçosa, MG, Brazil. Drainage lysimeters were utilized to measure daily ET<sub>c</sub> and T throughout both vegetative cycles. The coefficients were estimated using reference evapotranspiration (ET<sub>o,in</sub>) from the Penman-Monteith method and water consumption data from the lysimeters. The ET<sub>o,in</sub> was estimated by an in-greenhouse weather station, with values adjusted for the restricted ventilation environment. The total ET<sub>c</sub> for beetroot was 192 mm (2021) and 181 mm (2022). The contribution of soil evaporation to the total lysimeter water consumption was 36% (2021) and 47% (2022). The average estimated K<sub>c</sub> values were 0.62 and 1.18, while the K<sub>cb</sub> values were 0.11 and 0.83, for the initial and mid-season stages, respectively. Strong correlations were observed between K<sub>c</sub> and K<sub>cb</sub> and variables such as the fraction of ground cover by vegetation and the normalized difference vegetation index. These variables can therefore be used to estimate the water consumption of beetroot via remote sensing. The results of this study provide crucial parameters for estimating the evapotranspiration of the 'Early Wonder' beetroot cultivar grown under protected conditions, offering updated K<sub>c</sub> and K<sub>cb</sub> values and demonstrating the utility of remote sensing techniques to characterize real-world growing conditions.

Keywords: Penman-Monteith. Ground cover fraction. NDVI. Greenhouse. Plant canopy. *Beta vulgaris* L.

## 1 INTRODUÇÃO

A beterraba de mesa (*Beta vulgaris* L. var. *conditiva*) é uma hortaliça de raiz tuberosa com crescente importância na agricultura brasileira. Reconhecida como um alimento funcional, seu perfil nutricional, rico em vitaminas, minerais, fenóis, nitratos e betaínas, confere-lhe valor para as indústrias alimentícia, cosmética e farmacêutica (BARBU et al., 2020; CHHIKARA et al., 2019; KRUSZEWSKI; DOMIAN; NOWACKA, 2023).

Esse apelo nutricional e sua versatilidade têm impulsionado a cadeia produtiva da cultura no país, com uma comercialização estimada em mais de 113 mil toneladas em 2024, concentrada principalmente em São Paulo, Minas Gerais e Paraná (CONAB, 2025). Entretanto, a alta demanda por qualidade do produto, um fator crucial para a aceitação no mercado consumidor, expõe a vulnerabilidade da cultura ao estresse hídrico, que pode comprometer tanto a produção quanto a qualidade (HASSANLI; AHMADIRAD; BEECHAM, 2010; TIVELLI et al., 2011).

Para mitigar os efeitos do estresse hídrico e assegurar um desenvolvimento sustentável, a irrigação emerge como uma estratégia indispensável, especialmente em ambientes protegidos como casas de vegetação, onde a precipitação pluvial não supre a demanda evapotranspirativa. Nesse contexto, o desenvolvimento de um plano de irrigação eficaz para a beterraba em ambiente protegido requer a determinação precisa das necessidades hídricas da cultura em cada estágio de seu desenvolvimento.

O método padrão para estimar as necessidades hídricas é o cálculo da evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>), que é o produto da evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) pelo coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>). A ET<sub>0</sub> representa a demanda evaporativa da atmosfera e é calculada utilizando dados meteorológicos ou algoritmos, sendo o método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO 56 o padrão global. O K<sub>c</sub> ajusta a ET<sub>0</sub> às características físicas e fisiológicas de uma cultura específica. A abordagem de coeficiente duplo de cultivo é amplamente utilizada para mensurar o K<sub>c</sub>, separando a evaporação do solo (K<sub>e</sub>) da transpiração da cultura (K<sub>cb</sub>) (ALLEN et al., 2006).

A determinação dos valores de K<sub>c</sub> pode ser realizada através de medições diretas em campo (por lisímetros, balanço hídrico do solo, etc.) ou por meio de dados disponíveis na literatura, como os apresentados em revisões recentes (PEREIRA et al., 2021). A integração do sensoriamento remoto (SR) tem se mostrado uma ferramenta promissora para a estimativa da evapotranspiração e dos coeficientes de cultivo, oferecendo uma abordagem ágil e acessível para o monitoramento agrícola. Apesar da vasta aplicação do sensoriamento remoto na

agricultura, como demonstram os estudos de Kharnal et al. (2020) e Pôças et al. (2020) sobre a evapotranspiração, a literatura ainda apresenta uma lacuna.

No entanto, a literatura ainda apresenta uma lacuna na aplicação de sensoriamento remoto para estabelecer a relação entre os coeficientes  $K_c$  e  $K_{cb}$  e variáveis como a fração de cobertura do solo ( $f_c$ ) para a cultura da beterraba. Essa lacuna é ainda mais acentuada em ambientes protegidos, onde a estimativa da demanda hídrica é mais complexa devido às diferenças entre o cultivo a campo e em casa de vegetação (TAMIMI *et al.*, 2022; FERNÁNDEZ *et al.*, 2010).

Nesta perspectiva, buscando ampliar a contribuição para um tema atual e de enorme importância para a agricultura, o objetivo nesta pesquisa foi: (a) mensurar o efeito da casa de vegetação em relação ao ambiente externo; (b) estimar o consumo de água da cultura da beterraba de mesa, cultivar Early Wonder, sem restrição hídrica, de forma direta por meio de lisímetros de drenagem; (c) determinar o coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) e o coeficiente de cultivo basal ( $K_{cb}$ ); e (d) obter a relação entre o  $K_c$  e o  $K_{cb}$  com as variáveis de fração de cobertura do solo coberta por vegetação ( $f_c$ ) e índices de vegetação por diferença normalizada (NDVI) obtidos por sensoriamento remoto.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Área experimental

O experimento consistiu em dois ciclos de cultivo da beterraba, cultivar Early Wonder, realizados em uma casa de vegetação, pertencente à área experimental de irrigação e drenagem do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa. A universidade está localizada no estado de Minas Gerais, Brasil (20°46'09" S, 42°51'45" W, 663 m a. s. l.).

O primeiro ciclo ocorreu na primavera de 2021 e o segundo ciclo no verão de 2022. A área de estudo situa-se na zona da mata mineira e é classificada como Cwa, segundo o sistema climático de Köppen, caracterizando-a por verões chuvosos e invernos secos (ALVARES *et al.*, 2013). A média histórica das condições climáticas da região, para o período de 1990 a 2020, é de 1261,6 mm  $\pm$  88,17 mm para a precipitação e as temperaturas médias anuais máxima e mínima são de 29,8°C  $\pm$  1,74 °C e 11,3°C  $\pm$  2,99°C, respectivamente.

O solo utilizado para preenchimento dos lisímetros foi solo classificado como Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico e caracterizado por análises física por Freitas *et al.*

(2023). A análise química (Tabela 1) foi realizada antes do transplante e o nitrogênio foi corrigido pela 5ª aproximação de Minas Gerais (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ, 1999).

**Tabela 1.** Análise físico-química do solo utilizado nos lisímetros.

Prof cm	pH H <sub>2</sub> O	P	K	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H + Al	SB
		mg dm <sup>-3</sup>			cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>			
0-20	6,35	1234	604	5,17	3,70	0,00	2,70	10,42
20-40	6,40	884	574	5,10	3,81	0,00	2,90	10,38
Prof cm	P-Rem mg/L	t	T	V	m	Areia	Silte	Argila
		cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>			%		g kg <sup>-1</sup>	
0-20	60,0	10,42	13,12	79,40	0,00	570,0	130,0	300,0
20-40	58,9	10,38	13,28	78,20	0,00			

Legenda: Prof – Profundidade; SB – Soma de Bases Trocáveis; P-Rem – Fósforo Remanescente; t - Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; T - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0, V - Índice de Saturação por Bases; m - Índice de Saturação por Alumínio.

Fonte: Santos, L. A. (2025).

## 2.2 Procedimentos Experimentais

Os tratamentos consistiram na evapotranspiração da grama (ETgrama), evapotranspiração da cultura (ETc), transpiração da cultura (Tc) e evaporação do solo (E). Foram utilizadas quatro repetições para cada tratamento, os quais variavam as áreas vegetadas.

A ETgrama foi determinada para a grama esmeralda (*Zoysia japonica* Steud.), que foi cultivada de forma análoga as características físicas descritas para a cultura de referência hipotética descrita por Allen et al. (1998), a qual a cultura era uniforme em toda a extensão e bordas do lisímetro, com altura padrão de 0,12 m, cobria toda superfície, crescendo ativamente, sombreando totalmente o solo e sem estresse hídrico. A ETc e a Tc foram medidas para a cultura da beterraba (*Beta vulgaris* L.), diferenciando os tratamentos pela presença ou ausência de cobertura no solo. Para a ETc, o solo tinha apenas a vegetação como cobertura. Para a Tc, usou-se cobertura do solo com filme plástico (*mulching*) branco nas parcelas, com o objetivo de minimizar a evaporação do solo. O tratamento E foi estimado para o solo sem vegetação e sem impedimentos físicos.

O experimento utilizou 16 lisímetros de drenagem (Figura 1) instalados em uma casa de vegetação com área de 90,72 m<sup>2</sup> (10,80 m de comprimento por 8,40 m de largura). A casa de vegetação tinha cobertura de filme plástico e era revestida por uma malha antiafídeo.

Os lisímetros tinham, em sua superfície, bordas arredondadas e 1,58 m de comprimento, 1,08 m de largura e 0,70 m de profundidade, totalizando uma área

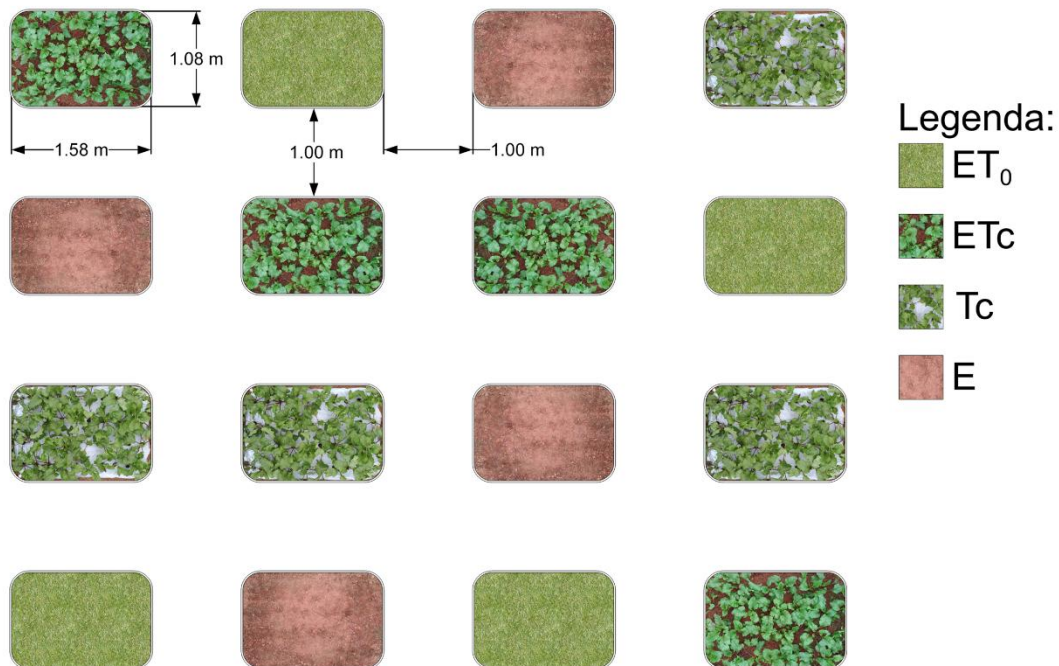
evapotranspirável de 1,68 m<sup>2</sup> e capacidade volumétrica de 1000 L. Eles foram preenchidos com solo representativo da área experimental e, na base, havia brita e areia para facilitar o escoamento da água pelos drenos até os reservatórios coletores. O solo utilizado para preenchimento dos lisímetros foi solo classificado como Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico.

A aplicação de água e a leitura dos volumes drenados pelos lisímetros foram feitas diariamente, às 7 horas da manhã, com intervalos de 24 horas. Os volumes de água aplicados e drenados eram medidos com uma balança digital (precisão de  $\pm 2,5$  g).

A água foi aplicada aos lisímetros com o objetivo de saturar o solo e, nas 24 horas seguintes, drenar o excesso, mantendo o teor de água próximo à capacidade de campo. Os valores para as irrigações nos lisímetros eram determinados pela estimativa da evapotranspiração do dia anterior, reajustando o volume de água aplicado.

Para adicionar água aos tratamentos ETgrama, ETc e E, usaram-se regadores que molhavam toda a área evapotranspirável do lisímetro. Para o tratamento Tc, utilizou-se fitas gotejadoras de irrigação sob a cobertura plástica.

**Figura 1.** Croqui com a disposição dos lisímetros e dos tratamentos que consistiram na evapotranspiração da grama (ET<sub>0</sub>), evapotranspiração da cultura (ETc), transpiração da cultura (Tc) e evaporação do solo (E).



Fonte: Santos, L. A. (2025).

### 2.3 Práticas agronômicas

Neste estudo, utilizou-se a beterraba (*B. vulgaris* L. var. *conditiva*) Early Wonder, que se destaca por ser uma cultivar precoce, com boa produtividade, resistente à *Cercospora* e pela uniformidade das raízes. Em cada lisímetro foram transplantadas 40 mudas, distribuídas em quatro fileiras com espaçamento de 0,25 m entre linhas e 0,15 m entre plantas.

No primeiro ciclo, as sementes foram plantadas diretamente no lisímetro e, no segundo ciclo, as mudas foram transplantadas (30 dias após a germinação). Em ambos os ciclos, realizou-se o desbaste quando as mudas tinham quatro folhas desenvolvidas e, em seguida, adicionou-se a cobertura plástica para quantificar os tratamentos de transpiração da cultura.

## 2.4 Elementos meteorológicos

O experimento utilizou duas estações meteorológicas automáticas (DAVIS Vantage Pro II), instaladas no exterior e no interior da casa de vegetação. A estação externa estava posicionada em uma região gramada, enquanto a estação interna ocupava o centro da casa de vegetação, situada entre os lisímetros.

Os dados meteorológicos foram registrados e armazenados a cada hora. Os elementos mensurados foram a radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar, e a velocidade do vento.

O modelo empírico de Penman-Monteith, padrão da FAO 56 (ALLEN et al., 2006), foi usado para estimar a evapotranspiração de referência com base nos valores meteorológicos diários. Foram considerados os dados das 24 horas seguintes às sete horas da manhã, momento do manejo do lisímetro.

## 2.5 Parâmetros estimados

### 2.5.1 Evapotranspiração de referência ( $ET_0$ )

A evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) foi estimada seguindo a metodologia da FAO 56. Na casa de vegetação, a velocidade do vento foi ignorada no cálculo da  $ET_0$ , devido à restrição dos fluxos de ar laterais em ambiente protegido. Em vez disso, foi usado o valor da resistência aerodinâmica ao transporte de calor e vapor da superfície ( $r_a$ ) de  $295 \text{ s m}^{-1}$ , conforme sugerido por Fernández et al. (2010) e descrito na equação 1.

$$ET_{0,in} = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{628}{T + 273}(e_s - e_a)}{\Delta + 1,24\gamma} \quad 1$$

Onde,  $ET_{0,in}$  é a evapotranspiração de referência da estação meteorológica na casa de vegetação, mm dia<sup>-1</sup>;  $\Delta$  é a declividade da curva de pressão de vapor em relação a temperatura, kPa °C<sup>-1</sup>;  $R_n$  é o saldo de radiação diário, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>;  $G$  é o fluxo total diário de calor no solo, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>;  $\gamma$  é o coeficiente psicrométrico, kPa °C<sup>-1</sup>;  $e_s$  é a pressão de saturação de vapor, kPa;  $e_a$  é o pressão atual de vapor, kPa; e  $T$  é o temperatura média do ar, °C.

### 2.5.2 Manejo dos lisímetros (ET)

A evapotranspiração da grama (ETgrama), evapotranspiração da cultura (ETc), transpiração da cultura (Tc) e a evaporação do solo (E) foram determinadas pelo método de balanço hídrico do solo usando a equação 2:

$$ET = P + I - D - R \pm \Delta ARM \quad 2$$

Onde,  $ET$  é a evapotranspiração do lisímetro, mm;  $P$  é a precipitação pluviométrica, mm;  $I$  é a irrigação, mm;  $D$  é a drenagem de água, mm;  $R$  é o escoamento superficial, mm; e  $\Delta ARM$  é a variação de armazenamento de água no solo, mm.

Como os lisímetros situavam-se em ambiente protegido, sem a presença de chuvas, a precipitação pluviométrica ( $P$ ) foi zero. Havia uma borda entre o solo e o interior do lisímetro, que impedia o escoamento de água superficial ( $R$ ), tornando-o nulo. Além disso, considerando a alta frequência e horário constante da irrigação, e o fato do solo voltar à capacidade de campo toda vez que a drenagem cessava, tornaram a variação no armazenamento de água no solo ( $\Delta ARM$ ) mínima e insignificante para o cálculo. Deste modo, a equação 2 foi simplificada para:

$$ET = I - D \quad 3$$

### 2.5.3 Coeficiente da cultura único (Single Kc)

Os valores do coeficiente da cultura ( $Kc$ ) para a beterraba foi determinado pela razão entre os valores da  $ETc$  pelos valores da  $ET_{0,in}$  mensurados pela estação meteorológica no interior da casa de vegetação (Eq. 4):

$$Kc = \frac{ETc}{ET_{0,in}} \quad 4$$

Onde  $Kc$  é o coeficiente de cultivo único, adimensional;  $ETc$  é a evapotranspiração da cultura, mm; e  $ET_{0,in}$  é a evapotranspiração de referência para a casa de vegetação, mm.

#### 2.5.4 Coeficiente duplo da cultura (Dual Kc)

O coeficiente duplo da cultura (Dual Kc) foi estimado para os lisímetros vegetados pela beterraba ao isolar os fenômenos da evaporação do solo ( $K_e$ ) e da transpiração da cultura ( $K_{cb}$ ). Assim, o coeficiente basal da cultura ( $K_{cb}$ ) foi mensurado pela razão entre a transpiração da cultura pela  $ET_{0,in}$  (Eq. 5).

$$K_{cb} = \frac{Tc}{ET_{0,in}} \quad 5$$

Onde  $K_{cb}$  é o coeficiente basal da cultura, adimensional; e  $Tc$  é a transpiração da cultura, mm.

O coeficiente de evaporação do solo vegetado ( $K_{ev}$ ) pela beterraba foi estimado pela diferença entre o coeficiente de cultivo (Eq. 4) pelo coeficiente basal da cultura (Eq. 5) em função do coeficiente de redução de evaporação ( $K_r$ ), conforme equação 6.

$$K_{ev} = K_r (K_{c,max} - K_{cb}) \quad 6$$

Onde  $K_{ev}$  é o coeficiente de evaporação do solo vegetado, adimensional;  $K_r$  é o coeficiente de redução de evaporação, adimensional; e  $K_{c,max}$  é o valor máximo do coeficiente da cultura após a chuva ou a irrigação, adimensional.

O  $K_r$  determina a energia disponível para evaporação na superfície do solo e seu valor é 1 (um) logo após eventos de irrigação com molhamento total do solo, como ocorria diariamente no experimento, ou em ocasiões de chuva, caso a cultura esteja no campo.

#### 2.5.5 Índice de vegetação de diferença normativa (NDVI)

A refletância espectral das superfícies foi expressa pelo índice de vegetação de diferença normativa (NDVI) (Eq. 7) ao ser estimada usando o sensor portátil GreenSeeker

(NTech Industries Incorporation, Ukiah, CA, USA). As leituras foram coletadas a uma distância aproximada de 0,70 m do dossel das culturas e da superfície do solo.

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad 7$$

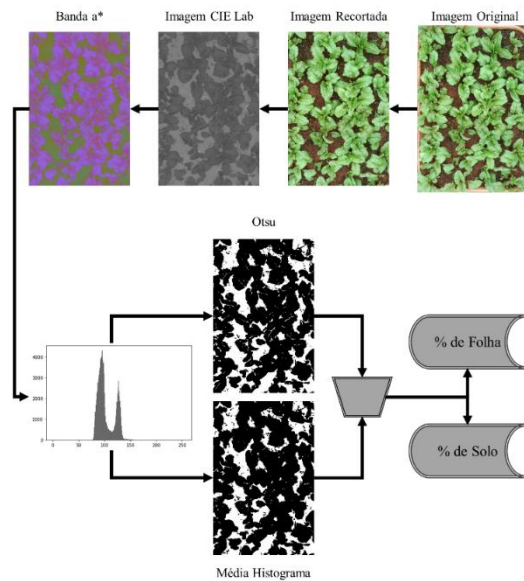
Onde *NDVI* é o índice de vegetação de diferença normativa; *IR* é a radiação do infravermelho próximo; e *R* é a radiação do vermelho.

### **2.5.6 Fração de cobertura do solo coberta por vegetação (fc)**

A fração de cobertura do solo coberta por vegetação para os tratamentos da evapotranspiração da cultura e transpiração da cultura foram estimadas por imagens capturadas pela manhã, às 7 horas, horário com predominância da iluminação difusa no ambiente, o que minimiza a formação de sombras. As imagens foram capturadas por um sensor CMOS com espaço de cor RGB. Todas as imagens foram recortadas para reduzir o efeito das bordas e convertidas para o espaço de cor CIE Lab\* e utilizada a banda a\* para realçar as colorações verde e vermelho das demais, possibilitando a limiarização da imagem para segmentar o dossel da cultura do solo, usando um limiar de intensidade.

O limiar da limiarização foi realizada pela média entre o maior e menor valor do histograma e pelo método de otimização de Otsu, posteriormente, a escolha do melhor método consistiu de modo manual ao comparar a imagem original com os resultados da limiarização. A porcentagem fração de cobertura do solo coberta por vegetação foi calculada dividindo a área das folhas pela área total da imagem. A biblioteca OpenCV para a linguagem Python foi utilizada para realizar as operações de conversão de espaço de cor e limiarização das imagens (Figura 2).

**Figura 2.** Fluxograma com a metodologia usada para a determinação da fração de cobertura do solo vegetado no cultivo da beterraba, cultivar Early Wonder



Fonte: Santos, L. A. (2025)

### 2.5.7 Análise estatística

Foram realizadas análises de regressão para investigar as relações entre: radiação externa e interna a casa de vegetação; amplitude entre as radiações e a transmissividade da casa de vegetação; fração de cobertura do solo vegetado ( $f_c$ ) em função dos dias após o plantio; coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) e coeficiente de cultivo basal ( $K_{cb}$ ) em relação ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI); e  $K_c$  e  $K_{cb}$  em relação a fração de cobertura do solo coberta por vegetação ( $f_c$ ).

Para avaliar a precisão dos ajustes obtidos, entre a comparação de valores observados e entre valores observados e estimados foram utilizadas as métricas estatísticas do coeficiente de determinação ( $R^2$ ; Eq. 8) e os indicadores de erros residual do erro absoluto médio (MAE; Eq. 9), da raiz do erro quadrático médio (RMSE; Eq. 10), do erro de viés médio (MBE; Eq. 11) e da eficiência de Nash–Sutcliffe (NSE; Eq. 12).

O  $R^2$  representa a proporção da variância dos dados que é explicado pelo modelo.

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left[ \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5} \left[ \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2$$

Onde  $O_i$  é o valor observado para uma determinada variável;  $P_i$  é o valor observado para uma determinada variável;  $i$  é o número da amostra;  $\bar{O}$  é o valor médio observado;  $\bar{P}$  é o valor médio predito; e  $n$  é o número de valores observados.

O erro médio absoluto (MAE), que expressa o tamanho médio dos erros da estimativa.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad 9$$

A raiz do erro quadrático médio (RMSE), expressando a variância dos erros residuais.

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right]^{0,5} \quad 10$$

O erro de viés médio (MBE), representando o erro sistemático do modelo de predição.

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad 11$$

A eficiência de Nash–Sutcliffe (NSE), determinar a magnitude relativa da variância residual em comparação com a variância dos dados observados.

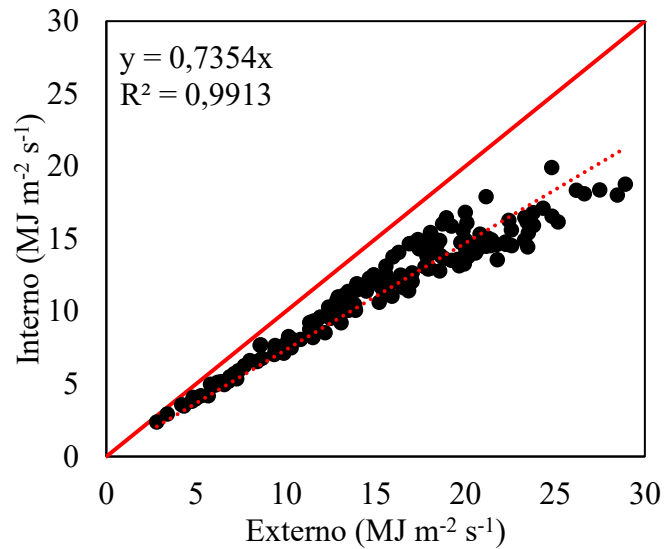
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad 12$$

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Radiação solar

A radiação solar interna da casa de vegetação foi menor do que a externa durante todo o período de avaliação (Figura 3), que abrangeu de 25 de setembro de 2021 a seis de março de 2022, totalizando 161 observações. Essa variação ocorre porque a cobertura da casa de vegetação atenua a radiação solar. A correlação positiva entre as radiações solar interna e externa sugere que a quantidade de radiação dentro da casa de vegetação está diretamente relacionada à radiação externa (Figura 3).

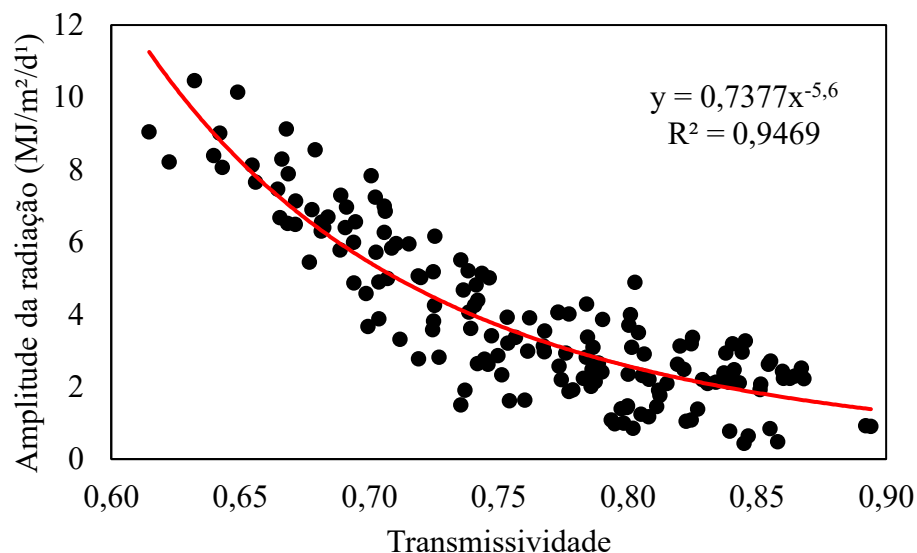
**Figura 3.** Relação entre a radiação solar externa e interna da casa de vegetação utilizada no cultivo da beterraba, cultivar Early Wonder.



Fonte: Santos, L. A. (2025).

Enquanto isso, a oscilação das amplitudes entre as radiações solares foi inversamente proporcional à transmissividade da casa de vegetação (Figura 4). A transmissividade média foi de aproximadamente 0,86. Assim, quanto maior a transmissividade, menor é a diferença entre a radiação solar externa e interna à casa de vegetação.

**Figura 4.** Diferença entre a amplitude da radiação e a transmissividade da casa de vegetação.



Fonte: Santos, L. A. (2025).

O ambiente protegido, propiciou um microclima, ocasionando uma elevação média na temperatura do ar (~3,3%), equilíbrio nos valores médios observados de umidade do ar (~0,4%),

redução média na velocidade do vento (98,4%) e radiação solar (23,88%) quando comparados ao ambiente externo a casa de vegetação.

A disponibilidade de luz no interior da casa de vegetação não é apenas influenciada pela cobertura da estrutura, mas varia de acordo com as características geográficas e sazonais ao longo do ano (JAAFAR; AHMAD, 2019). Consequentemente, observaram-se valores mais elevados de transmissividade da estufa ( $\tau$ ) em dias com menor disponibilidade de luz.

Ademais, a transmissividade da casa de vegetação é influenciada por diversos fatores, como o tipo e a idade do material da casa de vegetação, o sombreamento, a geometria e orientação da casa de vegetação que podem influenciar no balanço energético da estrutura, favorecendo um microclima no interior da estrutura (PAPADAKIS et al., 2000). É importante conhecer esses fatores para determinar as características de transmissividade à radiação da casa de vegetação.

**Tabela 2.** Indicadores da qualidade do ajuste para o erro médio absoluto (MAE), a raiz quadrática médio do erro (RMSE), do erro de viés médio (MBE) e da eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) para os valores observados de radiação solar externa e interna da casa de vegetação (Figura 3) e da amplitude da radiação e a transmissividade da casa de vegetação (Figura 4) para a cultura da beterraba, cultivar Early Wonder.

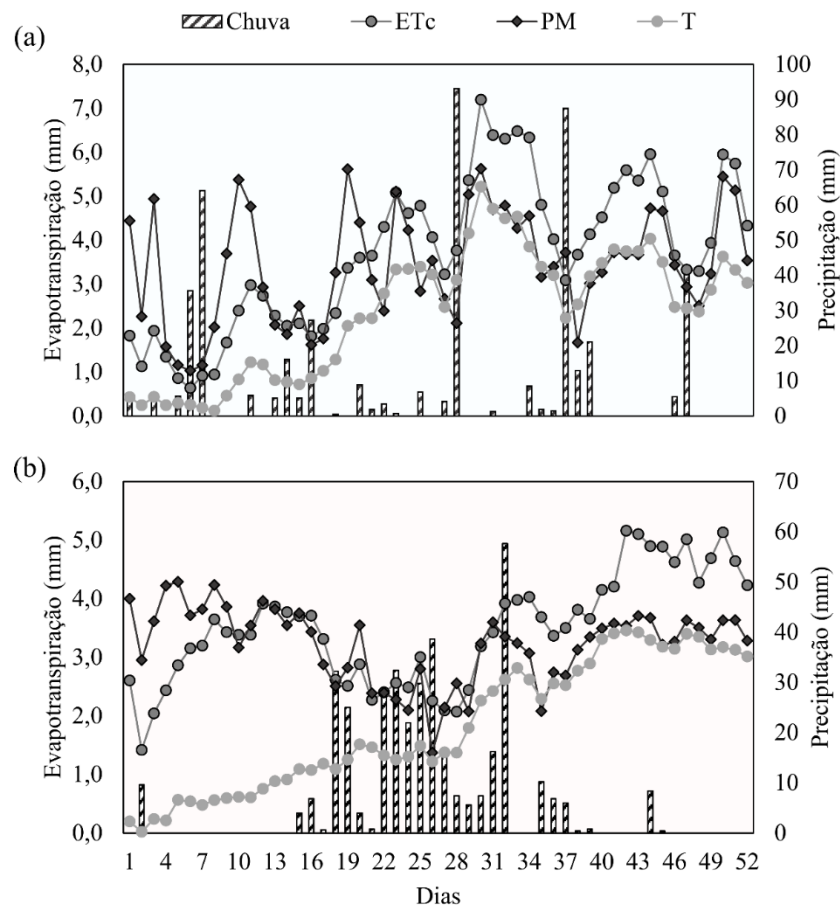
Tratamento	Indicadores de qualidade do ajuste			
	MAE	RMSE	MBE	NSE
Figura 3	3,901	4,514	-3,901	0,406
Figura 4	3,153	3,907	-3,139	-1,960

Fonte: Santos, L. A. (2025).

### 3.2 Evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>), evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) e consumo hídrico

No primeiro ciclo de cultivo da beterraba (2021) o maior valor observado para a evapotranspiração de referência interna (ET<sub>0,in</sub>) foi de 5,63 mm, coincidindo com o maior valor para a evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) cerca de 7,19 mm (Figura 5). No segundo ciclo (2022), os maiores valores para a ET<sub>0,in</sub> foram estimados no início do ciclo de cultivo da beterraba (4,29 mm), contrastando com os valores observados da ET<sub>c</sub>, que foram obtidos no período final do ciclo (5,16 mm) (Figura 5).

**Figura 5.** Variação diária das evapotranspirações (Penman- Monteith e ETc), da transpiração (Tc) e da precipitação (P), para os ciclos 2021 (a) e 2022 (b) de cultivo da beterraba, cultivar Early Wonder.

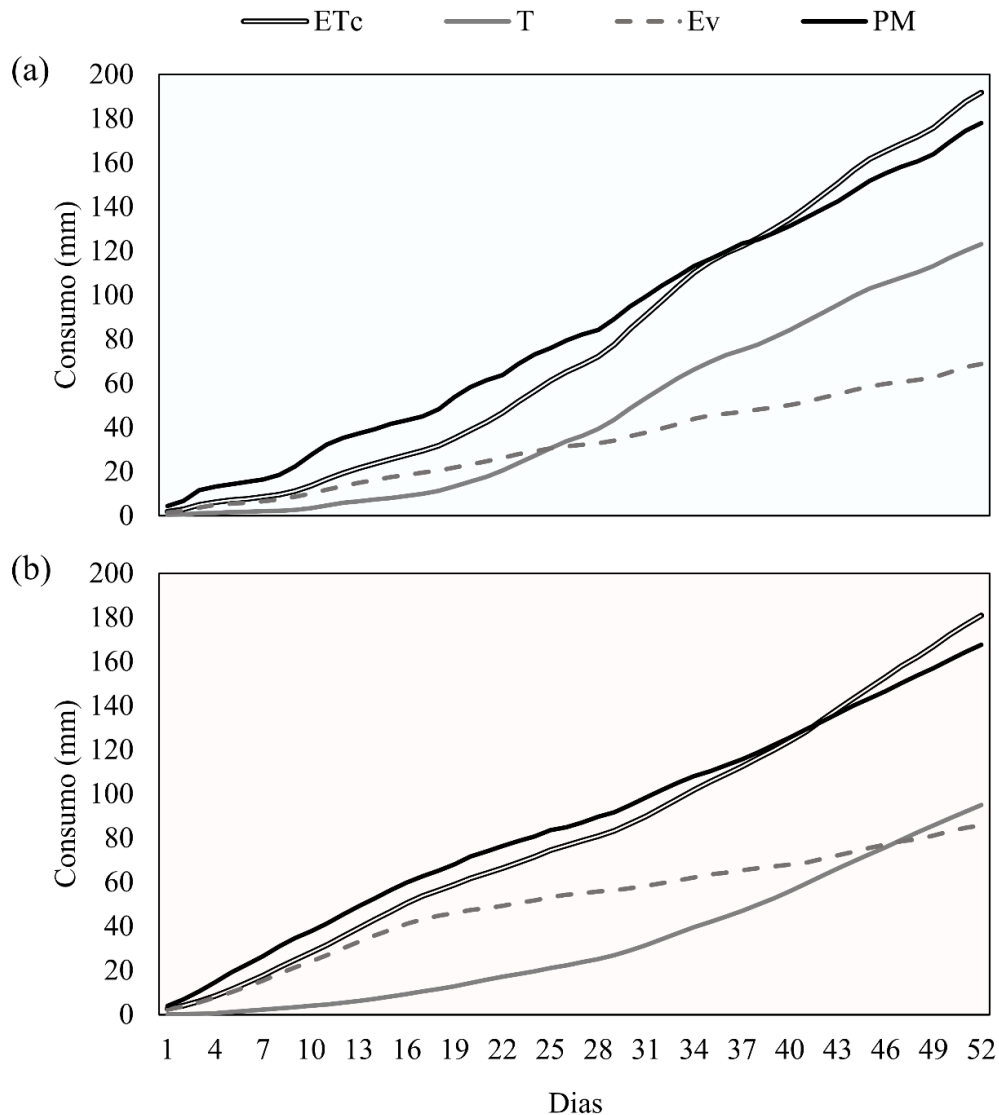


Fonte: Santos, L. A. (2025).

Os maiores valores de  $ET_{0,in}$  e ETc (2021) resultam da maior demanda atmosférica pelo vapor de água e simultaneamente com o estágio de desenvolvimento da beterraba, que se encontrava com uma fração de cobertura do solo superior a 90% (Figura 8). No segundo ciclo, os maiores valores de  $ET_{0,in}$  foram registrados no início do cultivo, quando a fração de cobertura do solo era mínima. Essas diferenças entre os ciclos podem estar relacionadas a época de cultivo, uma vez que a ET0 em climas como o Cwa tem alta variabilidade ao longo das estações (JERSZURKI; SOUZA; SILVA, 2019).

O consumo de água acumulado para a evapotranspiração de referência interna ( $ET_{0,in}$ ), a evapotranspiração da cultura (ETc) e a transpiração da beterraba foram menores em 2022 do que em 2021 (Figura 6). A  $ET_{0,in}$  foi de 178 mm (2021) e 168 mm (2022), enquanto a ETc da beterraba foi estimada em 192 mm (2021) e 181 mm (2022). A transpiração da cultura (Tc) alcançou 123 mm (2021) e 95 mm (2022). Enquanto a evaporação do solo, estimada pela diferença entre a ETc e Tc, foi de 69 mm (2021) e 135 mm (2022).

**Figura 6.** Soma do consumo hídrico dos ciclos de cultivo para a evapotranspiração de referência por Penman-Monteith (PM), evapotranspiração da cultura (ETc), transpiração da cultura (Tc) e a evaporação do solo vegetado (Ev) para os ciclos 2021 (a) e 2022 (b).



Fonte: Santos, L. A. (2025).

Pesquisas evidenciam que a beterraba, cultivada em ambiente protegido, apresenta uma redução comprovada no consumo de água (SILVA et al., 2014). Esse efeito também é observado quando são empregadas práticas como o uso de coberturas mortas, como o mulching (OLIVEIRA NETO et al., 2011) ou quando comparado ao cultivo em ambiente externo à casa de vegetação (SANTOS et al., 2018).

A evaporação do solo teve uma participação maior na transferência de água para a atmosfera no ano de 2022 (47%) se comparado ao ano de 2021 (36%). Isso pode estar relacionado com as diferentes demandas evaporativas entre as épocas estudadas. Em 2021, ocorreram maiores picos de demandas evaporativas, enquanto em 2022 a demanda hídrica foi

mais uniforme, com maior sequência de dias chuvosos (Figura 5). Além disso, houve uma redução de aproximadamente 6% no consumo de água da cultura nos tratamentos  $ET_{0,in}$  e  $ET_c$ , do ciclo de 2021 para 2022.

Em 2021 a precipitação foi de 478 mm, enquanto em 2022 a chuva acumulada foi de 377 mm. Embora esteja em ambiente protegido, a chuva interfere por meio das condições necessárias a seu surgimento, como a ocorrência de nuvens que reduzem a radiação incidente sobre a superfície cultivada, a maior umidade atmosférica que reduz o potencial evapotranspirativo do sistema planta-solo para atmosfera entre outros, resultando em reduções acentuadas na demanda evaporativa do ambiente em dias que registraram precipitações.

A soma do consumo hídrico diário da grama foi de 103 mm (2021) e 141 mm (2022). O solo sem vegetação teve a evaporação média de 111 mm (2021) e 135 mm (2022). O presente estudo mostrou que o solo sem vegetação, submetido a um manejo diário, proporcionava uma disponibilidade de energia livre para a evaporação, cuja condição pode explicar a proximidade nos valores de consumo entre o solo sem cultivo e a parcela vegetada pela grama.

Os resultados obtidos podem ser atribuídos à dinâmica da evaporação do solo, que se desdobra em dois estágios distintos. No primeiro estágio, denominado de energia limitada, a taxa de evaporação permanece constante e é influenciada por fatores meteorológicos, especialmente após períodos de chuva ou irrigação. No segundo estágio, conhecido como taxa de queda, a evaporação é sensível à umidade do solo e às suas propriedades (AMAZIRH et al., 2021).

Um ponto intrigante neste estudo é que, em ambos os ciclos, o consumo de água pela grama foi inferior ao estimado pela equação de Penman-Monteith. Esses resultados podem estar relacionados a alguns parâmetros fixos utilizados na equação de Penman-Monteith para ajudar expressar as características específicas da atmosfera. Entre eles, o calor latente de vaporização ( $\lambda$ ), a constante psicrométrica ( $\gamma$ ) e a inclinação da curva de pressão de vapor de saturação ( $\Delta$ ).

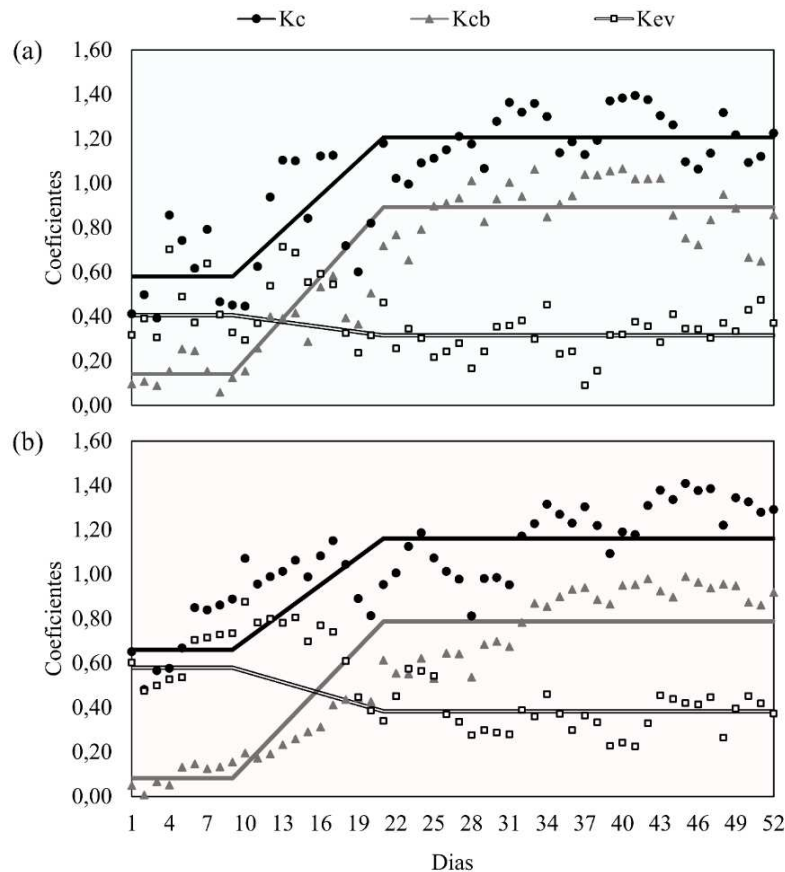
Por exemplo, o parâmetro calor latente de vaporização ( $\lambda$ ), que expressa a energia para transformar água de líquido para vapor, varia em função da temperatura do ar (YU et al., 2020). Em uma temperatura alta, menos energia será necessária para conversão do vapor de água do que em temperaturas mais baixas. Em geral, um único valor de  $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$  é considerado na simplificação da equação de Penman-Monteith da FAO, pois  $\lambda$  varia apenas ligeiramente em relação às faixas normais de temperatura do ar em torno de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  (ALLEN et al., 2011). Assim, essa padronização pode ter contribuído para a subestimação do consumo hídrico da grama, já que as condições de cultivo ocorreram em temperaturas reais variáveis acima de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

O comportamento entre o consumo hídrico da grama e o solo e entre a grama e a  $ET_{0,in}$  proporcionaram interação positiva, demonstrando respostas análoga às condições edafoclimáticas às quais estavam expostas. O índice de Pearson entre a interação do consumo da grama e a  $ET_{0,in}$  foi de 82,66% (2021) e de 77,92% (2022). A interação entre o consumo da grama e o solo sem vegetação, pelo índice de Pearson, foi de 78,51% (2021) e 91,39% (2022).

### 3.3 Coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), coeficiente basal da cultura ( $K_{cb}$ ) e coeficiente do solo vegetado ( $K_{ev}$ )

No cultivo da beterraba foram identificados três estágios distintos de crescimento pelas mudanças sazonais para os coeficientes (Figura 7). No primeiro estágio, chamado de fase de estabelecimento, houve uma maior dispersão dos valores de  $K_c$ , principalmente para a evapotranspiração da cultura ( $E_{Tc}$ ), indicando que o solo interferiu no consumo de água da beterraba. O  $K_c$  da beterraba foi estimado em 0,58 (2021) e 0,66 (2022).

**Figura 7.** Variação dos coeficientes de cultivo ( $K_c$ ), basal da cultura ( $K_{cb}$ ) e de evaporação do solo vegetado ( $K_{ev}$ ) diários para os ciclos 2021 (a) e 2022 (b) de cultivo da beterraba, cultivar Early Wonder.



Nesta fase inicial de cultivo, como a cultura apresenta menor índice de área foliar, a evaporação da água do solo predomina sobre a transpiração da planta. Além disso, como a planta transpira menos no início do seu desenvolvimento, o  $K_c$  sofre interferência de fatores abióticos (FREITAS et al., 2023).

No segundo estágio, chamado de fase de desenvolvimento, houve um rápido crescimento do  $K_c$  da beterraba, com o valor máximo coincidindo com uma ampla cobertura do solo (maior que 50% de cobertura) (Figura 8). Na fase intermediária (terceiro e último estágio), o valor médio para o  $K_c$  foi de 1,21 (2021) e 1,16 (2022), caracterizando a transpiração como fator de maior domínio no ambiente.

O processo de transpiração é altamente dependente das variáveis climáticas locais de radiação, temperatura do ar, umidade do ar e velocidade do vento. Além disso, as características morfológicas e fenológicas da cultura, e as práticas agrícolas irão influenciar na transpiração do vegetal (GRANATA, 2019).

Na fase inicial, o  $K_{cb}$  da beterraba foi de 0,14 (2021) e 0,08 (2022). Na fase intermediária, os valores de  $K_{cb}$  foram de 0,88 (2021) e 0,79 (2022). Assim, com a abordagem do duplo coeficiente da cultura (Dual  $K_c$ ) observa-se como o solo no ambiente vegetado se comportou ao longo dos estágios de desenvolvimento da beterraba (Figura 7).

Os resultados dos coeficientes da cultura da beterraba encontrados nesta pesquisa assemelham-se ao comportamento descrito por Pereira et al. (2021):  $K_c$  ini de 0,50,  $K_c$  mid de 1,05 e  $K_c$  end de 1,00, e os valores de  $K_{cb}$  ini de 0,15,  $K_{cb}$  mid de 0,95 e  $K_{cb}$  end de 0,90. Contudo, os valores diferem de outras pesquisas (OLIVEIRA NETO et al., 2011; SANTOS et al., 2018; SILVA et al., 2014), cujas variações no comportamento dos coeficientes são maiores. Essas diferenças nos coeficientes podem estar relacionadas com a forma de mensuração, o tempo de colheita, a localidade, o tipo de cobertura do solo e o ambiente de cultivo da beterraba.

Cabe salientar que comumente os valores dos coeficientes sugerem uma menor variação entre as fases intermediária e final. Isso ocorre porque, na determinação do coeficiente, o final da fase intermediária e o início da fase final são geralmente caracterizados pela senescência das folhas, entretanto para culturas agrícolas mais precoce, como a beterraba, que é colhida fresca, a duração da época final é relativamente curta e com menor efeito da senescência (ALLEN et al., 2006; PEREIRA et al., 2021). Essa tendência é similar ao observado nesta pesquisa, em que não foi possível distinguir a fase final do desenvolvimento da cultura com o início da fase final do ciclo da beterraba.

Ao estimar o coeficiente do solo vegetado ( $K_{ev}$ ) observou-se, na fase inicial de desenvolvimento da cultura, os valores médios de 0,41 (2021) e de 0,58 (2022), enquanto, na fase intermediária, os valores médios encontrados foram de 0,31 (2021) e 0,38 (2022).

Os maiores valores do  $K_c$  e  $K_{cb}$  em 2021 podem estar relacionados a maior fração de cobertura do solo que a cultura proporcionou em relação a 2022 (Figura 8). Isso porque a demanda de água de uma cultura é moldada pelo ambiente em que é cultivada (TAMIMI et al., 2022).

**Tabela 3.** Indicadores da qualidade do ajuste para o erro médio absoluto (MAE), a raiz quadrática médio do erro (RMSE), do erro de viés médio (MBE) e da eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) para os valores observados e preditos do coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), coeficiente de cultivo basal de cultura ( $K_{cb}$ ) e coeficiente de evaporação do solo vegetado ( $k_{ev}$ ) para os anos de 2021 e 2022 para a cultura da beterraba, cultivar Early Wonder.

Ano	Tratamento	Indicadores de qualidade do ajuste			
		MAE	RMSE	MBE	NSE
2021	$K_c$	0,136	0,166	0,010	0,672
	$K_{cb}$	0,103	0,136	0,025	0,829
	$K_{ev}$	0,094	0,125	-0,031	0,134
2022	$K_c$	0,153	0,174	-0,056	0,385
	$K_{cb}$	0,166	0,133	-0,004	0,828
	$K_{ev}$	0,107	0,135	-0,045	0,423

Fonte: Santos, L. A. (2025).

Normalmente, o  $K_c$  é obtido pela relação entre o consumo da cultura de interesse e de uma cultura hipotética. O método internacionalmente utilizado, Penman-Monteith, possui limitações a sua aplicação em ambientes com fluxo de vento vertical, como em casas de vegetação, pois só leva em consideração o fluxo de vento horizontal (YAN et al., 2018). Esse fato impacta diretamente nos valores de resistência aerodinâmica, parâmetro que influencia na transferência do fluxo de energia e vapor de água da superfície para a atmosfera (YAN et al., 2018, 2019), alterando o  $K_c$  estimado. Dessa forma, salientamos a necessidade de realizar a correção para ambientes protegidos.

### 3.4 Fração de cobertura do solo coberta por vegetação ( $f_c$ ) e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

Para avaliação da fração de cobertura do solo coberta por vegetação ( $f_c$ ), foi realizada a média entre os tratamentos de ETc e Tc em seus respectivos anos, devido ao desvio padrão

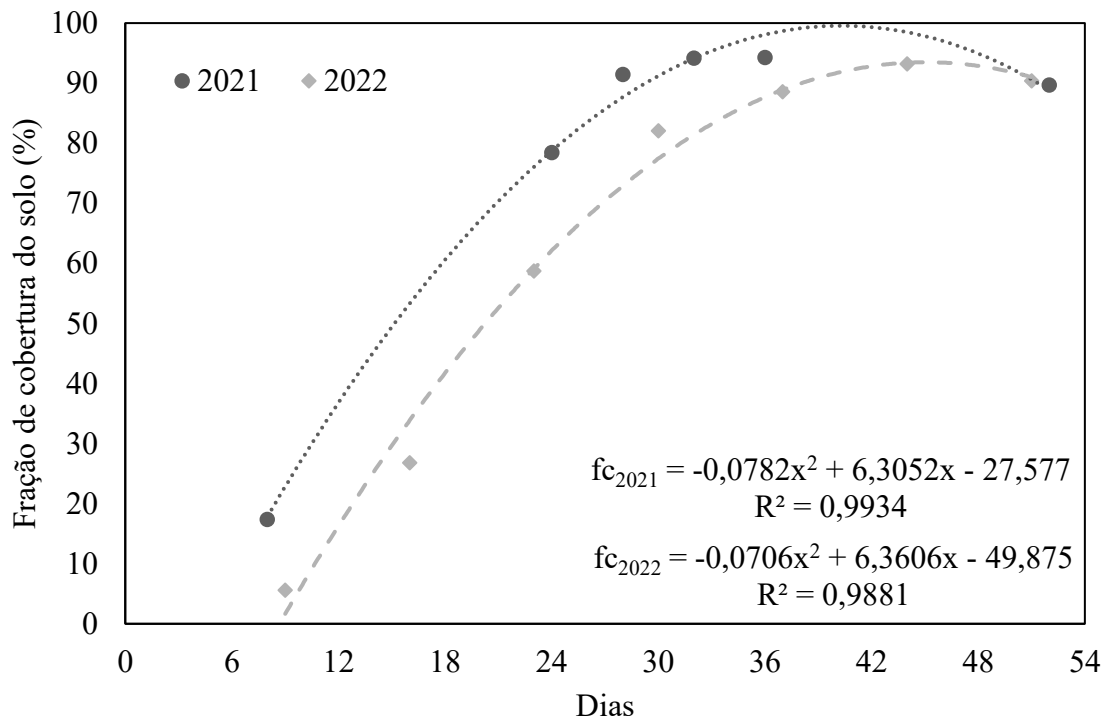
entre os tratamentos menor que 1% em média. Isso indica que as áreas dos tratamentos da ETc e Tc eram fotossinteticamente análogas.

A fração de cobertura do solo média foi maior durante todo o ciclo de cultivo da beterraba no ano de 2022, quando comparada ao ano de 2021. Essa diferença pode ser explicada pela forma de implementação da cultura em campo. No ano de 2022, o transplante das mudas pode ter causado estresse na beterraba, necessitando de mais tempo para adaptação no ambiente de cultivo (Figura 8).

A beterraba, cultivar Early Wonder, é uma cultura que possui alta fração de cobertura do solo. Em 2021, aos 40 dias de avaliação, a  $f_c$  foi de 99,52%. Em 2022, a fração máxima da cobertura foi atingida aos 45 dias, com um valor de 93,39%.

A beterraba é propagada por sementes e ela pode ser implantada pela semeadura direta no local de cultivo ou pelo transplante de mudas. O transplante prolonga o ciclo da cultura e pode ocasionar danos ao sistema radicular, contudo reduz o consumo de sementes, o que viabiliza o uso de sementes híbridas, que são mais caras (TIVELLI et al., 2011). Essa diferença também é perceptível na produção dos tubérculos, em que a implantação com semeadura direta resulta em uma maior produtividade (FACTOR et al., 2019; GRIBOGI; SALLES, 2007).

**Figura 8.** Fração média da cobertura do solo coberta por vegetação em função dos dias de cultivo para os ciclos 2021 e 2022 do cultivo da beterraba, cultivar Early Wonder.



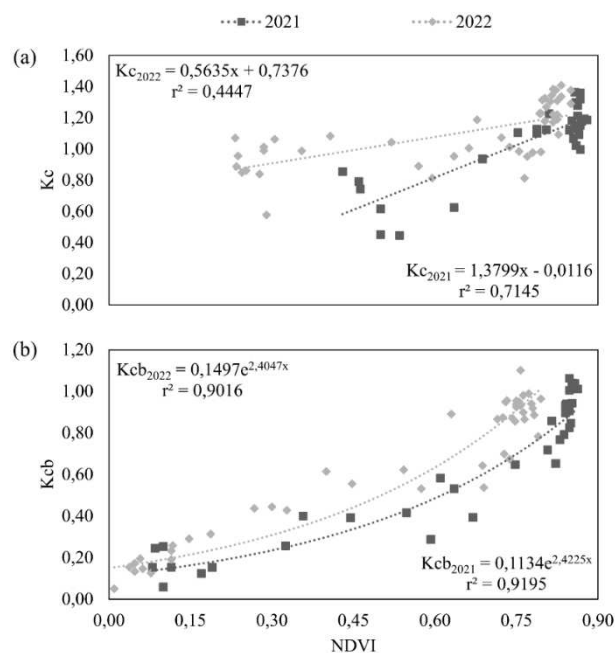
Fonte: Santos, L. A. (2025).

A estimativa do coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) para a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) apresentou uma tendência linear ao ser correlacionado com os valores observados de índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (Figura 9a). Na estimativa do coeficiente de cultivo basal ( $K_{cb}$ ) para a transpiração da cultura, a correlação observada com o NDVI foi exponencial (Figura 9b).

A variação nos resultados pode ser atribuída à influência da cobertura do solo no início do ciclo. No tratamento de  $ET_c$ , o solo sem cultivo apresentava um NDVI médio de 0,25, ao passo que o solo com mulching branco registrava um NDVI médio de 0,05. Esses valores predominavam quando a fração de cobertura do solo era pouco vegetada, aumentando gradualmente ao longo do ciclo à medida que a vegetação se expandia sobre a área de solo exposto, conforme Toureiro *et al.* (2017).

Uma observação perceptível em relação ao NDVI foi a formação de uma nuvem de valores que se acumula nos pontos com altos índices de vegetação, indicando uma saturação desses pontos (Figura 9). Isso porque o NDVI está intimamente relacionado com parâmetros biofísicos da vegetação. A desvantagem, entretanto, está na perda de sensibilidade às condições ambientais e de biomassa quando atinge um limite e fica saturado, resultando na insensibilidade do índice de responder ao aumento da biomassa vegetal (GHAMARNIA; MOUSABEYGI; REZVANI, 2021; MARCIAL-PABLO *et al.*, 2021).

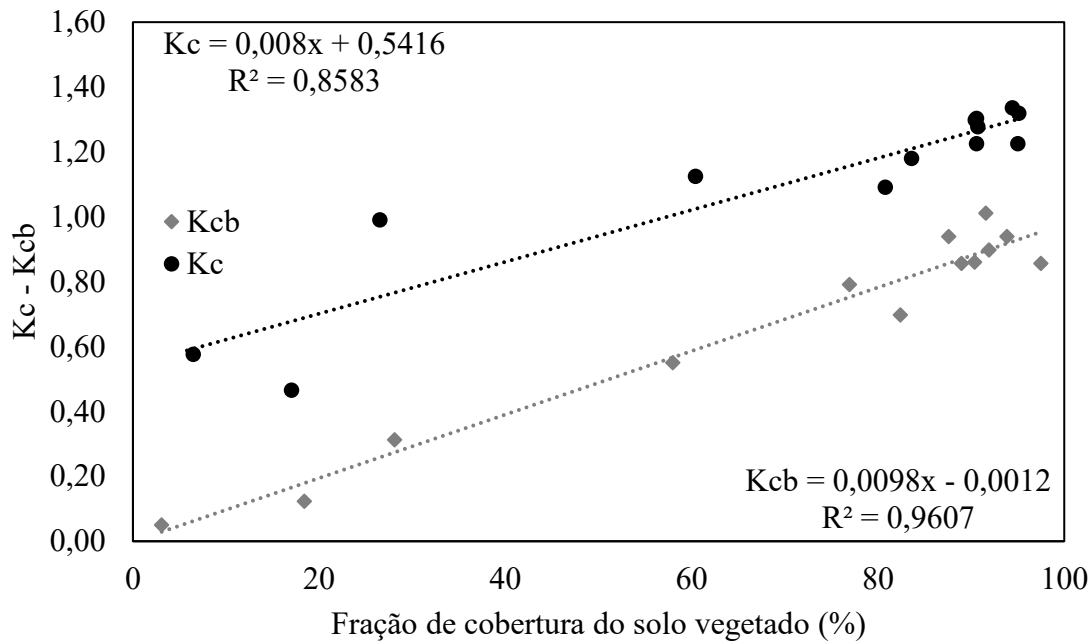
**Figura 9.** Variação do coeficiente de cultivo (a) e coeficiente basal da cultura (b) em função do índice vegetativo NDVI para o cultivo da beterraba, cultivar Early Wonder.



Além disso, a cultura da beterraba, nesta fase do desenvolvimento, está em expansão e acúmulo de biomassa do tubérculo, limitando-se a manter a área fotossinteticamente ativa, contudo sem ampliá-la (GOLDMAN, 2020; ZIERER et al., 2021).

A estimativa do  $K_c$  e do  $K_{cb}$  apresentaram uma tendência linear positiva ao ser correlacionado com os valores observados na fração de cobertura do solo vegetado ( $f_c$ ) (Figura 10). Essa tendência indica que, quanto maior a fração de cobertura do solo vegetado, maiores serão os valores de  $K_c$  e  $K_{cb}$ , demonstrando a evolução do consumo hídrico do vegetal com o crescimento da área foliar. A diferença de valores entre os tratamentos também pode ser explicada pelo impacto que a evaporação do solo tem no  $K_c$ .

**Figura 10.** Variações dos coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) e basal da cultura ( $K_{cb}$ ) em função da fração de cobertura do solo ( $f_c$ ) para o cultivo da beterraba da beterraba.



Fonte: Santos, L. A. (2025).

As relações entre os índices de vegetações podem ser usadas para estimar o coeficiente de cultivo e o coeficiente de cultivo basal (LÓPEZ-URREA et al., 2020; MARCIAL-PABLO et al., 2021; TOUREIRO et al., 2017; ZHANG et al., 2023). No entanto, essas relações apresentam uma grande variabilidade, que é dependente de uma série de fatores, como o tipo da cultura, o manejo de irrigação, as condições climáticas e que resultam em uma diversidade de relações, sejam lineares, empíricas e não-lineares (PÔÇAS et al., 2020).

Outra abordagem adotada é a utilização da fração de cobertura do solo vegetada na estimativa do  $K_c$  e  $K_{cb}$ , que é menos dependente dos fatores que influenciam a variabilidade

das relações entre os índices de vegetação, como ocorre com o NDVI, que satura em culturas que possui alto índice de área foliar (LÓPEZ-URREA et al., 2020; MARCIAL-PABLO et al., 2021). A utilização da fração de cobertura do solo vegetada na estimativa do  $K_c$  e  $K_{cb}$  demonstrou bons resultados para a beterraba, com coeficiente de determinação superior a 85% para o  $K_c$  e de 96% para o  $K_{cb}$  (Figura 10).

Este estudo foi realizado em uma única casa de vegetação, localizada em uma única região, durante dois ciclos de cultivo. Portanto, os resultados podem não ser generalizados para outras casas de vegetação, localizadas em outras regiões, sendo necessário a realização de estudos em demais regiões.

#### 4 CONCLUSÕES

A casa de vegetação molda o ambiente interno, quando comparado ao meio externo, ao propiciar um microclima nos elementos os quais o compoem, principalmente a velocidade do vento e a radiação solar.

O consumo hídrico da beterra, em ambiente protegido, para a zona da mata mineira, é em média 186,5 mm para o cultivo sem cobertura do solo e de 109 mm quando utilizado filme plástico branco para mitigar a evaporação do solo.

Os coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) da cultura da beterraba, cultivar Early Wonder, no sistema convencional em casa de vegetação, são recomendados os valores de  $K_c$ : 0,62 (inicial) e 1,18 (intermediária); e os valores de  $K_{cb}$ : 0,11 (inicial) e 0,83 (intermediária).

É possível estimar e monitorar as necessidades hídricas da beterraba, cultivar Early Wonder, ao determinar o coeficiente de cultura ( $K_c$ ) e o coeficiente de cultura basal ( $K_{cb}$ ) por meio do sensoriamento remoto, seja pela fração de cobertura do solo ( $f_c$ ) ou pelo índice de vegetal por diferença normalizada (NDVI).

Os resultados desse estudo fornecem parâmetros para a estimativa da evapotranspiração da cultura da beterraba, cultivar Early Wonder, cultivada em ambiente protegido, com os valores atualizados de  $K_c$  e  $K_{cb}$  e a utilização de técnicas de sensoriamento remoto para caracterizar as condições reais de cultivo.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G. et al. **Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. Rome: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>>.
- ALLEN, R. G. et al. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 6, p. 899–920, 2011.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.
- AMAZIRH, A. et al. Implementing a new texture-based soil evaporation reduction coefficient in the FAO dual crop coefficient method. **Agricultural Water Management**, v. 250, p. 106827, maio 2021.
- BARBU, V. et al. Three Types of Beetroot Products Enriched with Lactic Acid Bacteria. **Foods**, v. 9, n. 6, p. 786, 14 jun. 2020.
- CHHIKARA, N. et al. Bioactive compounds of beetroot and utilization in food processing industry: A critical review. **Food Chemistry**, v. 272, p. 192–200, jan. 2019.
- CONAB. **Programa Brasileiro de Modernização do Mercado Hortigranjeiro**. Disponível em: <<https://dw.ceasa.gov.br/>>.
- FACTOR, T. L. et al. Yield and quality of table beet in function of plant establishment method and production system. **Acta Horticulturae**, n. 1249, p. 37–42, set. 2019.
- FERNÁNDEZ, M. D. et al. Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. **Irrigation Science**, v. 28, n. 6, p. 497–509, 23 set. 2010.
- FREITAS, E. M. DE et al. Evapotranspiration and crop coefficient of *Physalis peruviana* cultivated with recycled paper as mulch. **Scientia Horticulturae**, v. 320, p. 112212, out. 2023.
- GHAMARNIA, H.; MOUSABEYGI, F.; REZVANI, V. Water Requirement, Crop Coefficients of Peppermint (*Mentha piperita* L.) and Realizing of SIMDualKc Model. **Agrotechniques in Industrial Crops**, v. 1, n. 3, p. 110–121, 2021.
- GOLDMAN, I. L. The root vegetables: beet, carrot, parsnip, and turnip. In: **The physiology of vegetable crops**. UK: CABI, 2020. p. 399–420.
- GRANATA, F. Evapotranspiration evaluation models based on machine learning algorithms—A comparative study. **Agricultural Water Management**, v. 217, n. March, p. 303–315, maio 2019.
- GRIBOGI, C. C.; SALLES, R. F. DE M. VANTAGENS DA SEMEADURA DIRETA NO CULTIVO DE BETERRABA. **Revista Acadêmica: Ciência Animal**, v. 5, n. 1, p. 33, 15 jan. 2007.

HASSANLI, A. M.; AHMADIRAD, S.; BEECHAM, S. 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, 1 fev. 2010.

JAAFAR, H. H.; AHMAD, F. Determining Reference Evapotranspiration in Greenhouses from External Climate. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 145, n. 9, set. 2019.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M. DE; SILVA, L. DE C. R. Sensitivity of ASCE-Penman–Monteith reference evapotranspiration under different climate types in Brazil. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 1–2, p. 943–956, 17 jul. 2019.

KHANAL, S. et al. Remote Sensing in Agriculture—Accomplishments, Limitations, and Opportunities. **Remote Sensing**, v. 12, n. 22, p. 3783, 19 nov. 2020.

KRUSZEWSKI, B.; DOMIAN, E.; NOWACKA, M. Influence of High-Pressure Homogenization on the Physicochemical Properties and Betalain Pigments of Red Beetroot (*Beta vulgaris* L.) Juice. **Molecules**, v. 28, n. 5, p. 2018, 21 fev. 2023.

LÓPEZ-URREA, R. et al. Evapotranspiration and crop coefficients from lysimeter measurements for sprinkler-irrigated canola. **Agricultural Water Management**, v. 239, p. 106260, set. 2020.

MARCIAL-PABLO, M. DE J. et al. Maize Crop Coefficient Estimation Based on Spectral Vegetation Indices and Vegetation Cover Fraction Derived from UAV-Based Multispectral Images. **Agronomy**, v. 11, n. 4, p. 668, 1 abr. 2021.

OLIVEIRA NETO, D. H. et al. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo da beterraba orgânica sob cobertura morta de leguminosa e gramínea. **Horticultura Brasileira**, v. 29, n. 3, p. 330–334, set. 2011.

PAPADAKIS, G. et al. Radiometric and Thermal Properties of, and Testing Methods for, Greenhouse Covering Materials. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 77, n. 1, p. 7–38, 2000.

PEREIRA, L. S. et al. Standard single and basal crop coefficients for vegetable crops, an update of FAO56 crop water requirements approach. **Agricultural Water Management**, v. 243, p. 106196, jan. 2021.

PÔÇAS, I. et al. Remote sensing for estimating and mapping single and basal crop coefficients: A review on spectral vegetation indices approaches. **Agricultural Water Management**, v. 233, p. 106081, 30 abr. 2020.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (EDS.). **5ª Aproximação - Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa, MG: UFV, 1999.

SANTOS, D. P. DOS et al. Performance of methods for estimation of table beet water requirement in Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 189–193, mar. 2018.

SILVA, A. O. DA et al. EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTIVO PARA

A BETERRABA SOB ESTRESSE SALINO EM AMBIENTE PROTEGIDO. **Irriga**, v. 19, n. 3, p. 375, 17 out. 2014.

TAMIMI, M. AL et al. Evapotranspiration and crop coefficients using lysimeter measurements for food crops in the hyper-arid United Arab Emirates. **Agricultural Water Management**, v. 272, p. 107826, out. 2022.

TIVELLI, W. S. et al. **BETERRABA: DO PLANTIO À COMERCIALIZAÇÃO**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2011.

TOUREIRO, C. et al. Irrigation management with remote sensing: Evaluating irrigation requirement for maize under Mediterranean climate condition. **Agricultural Water Management**, v. 184, p. 211–220, abr. 2017.

YAN, H. et al. Parametrization of aerodynamic and canopy resistances for modeling evapotranspiration of greenhouse cucumber. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 262, p. 370–378, nov. 2018.

YAN, H. et al. Energy partitioning of greenhouse cucumber based on the application of Penman-Monteith and Bulk Transfer models. **Agricultural Water Management**, v. 217, p. 201–211, maio 2019.

YU, H. et al. Uncertainty analysis of artificial intelligence modeling daily reference evapotranspiration in the northwest end of China. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 176, p. 105653, set. 2020.

ZHANG, Y. et al. Evaluating maize evapotranspiration using high-resolution UAV-based imagery and FAO-56 dual crop coefficient approach. **Agricultural Water Management**, v. 275, p. 108004, jan. 2023.

ZIERER, W. et al. Tuber and Tuberous Root Development. **Annual Review of Plant Biology**, v. 72, n. 1, p. 551–580, 17 jun. 2021.

## CAPÍTULO 2 – EVAPORAÇÃO E TRANSPIRAÇÃO ESTIMADA DA BETERRABA VERMELHA USANDO O MODELO SIMDUALKC

### RESUMO

A expansão da agricultura irrigada é uma realidade global, impulsionada pela crescente demanda por alimentos que deve ser acompanhada por uma gestão eficiente dos recursos naturais, evitando a limitação da água para as demais atividades humanas. O objetivo nesta pesquisa foi estimar a evaporação do solo e a transpiração da beterraba, cultivar Early Wonder (*Beta vulgaris* L., cv. 'Early Wonder'), utilizando o modelo SIMDualKc, com base em uma abordagem de balanço hídrico do solo. Para o processo de modelagem, foram utilizados dados de dois ciclos de cultivo consecutivos de beterraba, conduzidos em um campo experimental durante o período de outono/inverno em Viçosa, MG, Brazil. nesses experimentos, o manejo hídrico da cultura foi realizado por meio de um balanço hídrico baseado no clima. Uma estrutura de modelagem matemática foi desenvolvida para estimar a evapotranspiração da cultura (ETc) fundamentada na metodologia do coeficiente de cultivo duplo, descrita no Manual 56 da FAO. Esta foi avaliada sob dois cenários de irrigação distintos: irrigação plena (100% da ETc) e irrigação deficitária (50% da ETc). A precisão preditiva do modelo SIMDualKc foi quantificada usando um conjunto de indicadores estatísticos: o coeficiente de determinação ( $r^2$ ), o erro absoluto médio (MAE), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e a eficiência do modelo (EF). O modelo SIMDualKc apresentou precisão tanto em condições de irrigação plena quanto de estresse hídrico. O modelo passou por calibração em 2022 para simular a dinâmica da água no solo – incorporando parâmetros de solo, clima, cultura e irrigação – e foi subsequentemente validado com dados de 2023. Esses resultados confirmam o potencial do SIMDualKc como uma ferramenta avançada para otimizar o manejo da irrigação, melhorar a eficiência do uso da água e apoiar a tomada de decisão baseada em dados em ambientes agrícolas.

Palavras-chave: Coeficiente de cultivo duplo. Balanço hídrico do solo. Modelagem matemática. Condições de irrigação.

## ABSTRACT

The global expansion of irrigated agriculture, a phenomenon spurred by the rising demand for food, must be paralleled by the efficient stewardship of natural resources to preclude water limitations for other human enterprises. This research aimed to estimate soil evaporation and transpiration of beetroot (*Beta vulgaris* L., cv. 'Early Wonder') utilizing the SIMDualKc model, predicated on a soil water balance approach. For the modeling process, data were employed from two consecutive beetroot cultivation cycles conducted in an experimental field during the autumn/winter period in Viçosa, MG, Brazil. In these experiments, crop water management was executed via a climate-based water balance. A mathematical modeling framework was developed to estimate crop evapotranspiration (ET<sub>c</sub>) founded upon the dual crop coefficient methodology outlined in FAO Paper 56. This was assessed under two distinct irrigation scenarios: full irrigation (100% of ET<sub>c</sub>) and deficit irrigation (50% of ET<sub>c</sub>). The predictive accuracy of the SIMDualKc model was quantified using a suite of statistical indicators: the coefficient of determination ( $r^2$ ), mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), and model efficiency (EF). The SIMDualKc model exhibited precision under both full irrigation and water stress conditions. The model underwent calibration in 2022 to simulate soil water dynamics – incorporating soil, climate, crop, and irrigation parameters – and was subsequently validated using data from 2023. These results affirm the potential of SIMDualKc as a sophisticated tool for optimizing irrigation management, improving water use efficiency, and supporting data-driven decision-making in agricultural settings.

Keywords: Dual crop coefficient, soil water balance, modeling, irrigation strategies.

## 1 INTRODUÇÃO

Para garantir a segurança alimentar global frente a uma demanda crescente, a agricultura irrigada expandiu-se no globo, crescendo 112% em área nas últimas décadas (FAOSTAT, 2022; Hashemi *et al.*, 2024). O Brasil reflete essa tendência, posicionando-se no topo global com 8,2 milhões de hectares e vasto potencial de crescimento (ANA, 2021; FAOSTAT, 2022).. No entanto, essa expansão exerce uma pressão sem precedentes sobre os recursos hídricos globais, tornando o manejo eficiente da água não apenas uma meta de produtividade, mas uma necessidade para a sustentabilidade agrícola.

Para enfrentar esse desafio, agricultores necessitam de estimativas precisas da demanda hídrica das culturas, que orientam a correta aplicação da irrigação em termos de tempo, duração e volume. Essa demanda é quantificada pela evapotranspiração da cultura (ETc), um processo que combina a transpiração das plantas (T), diretamente ligada à produção de biomassa, com a evaporação da água do solo (E), uma perda não produtiva (Allen *et al.*, 1998). Um manejo adequado melhora o uso da água, maximiza a produtividade e minimiza os riscos ambientais associados ao quantificar essa demanda (Darouich *et al.*, 2021; Ramos *et al.*, 2023).

A estimativa da ETc é classicamente realizada a partir da evapotranspiração de referência (ET0), calculada pela equação FAO Penman-Monteith, e ajustada por um coeficiente de cultura (Kc) específico (Standard single and basal crop coefficients for field crops. Updates and advances to the FAO56 crop water requirements methodPereira *et al.*, 2021; Ramos *et al.*, 2023). Geralmente, utiliza-se uma abordagem de coeficiente único, que considera a ETc como um único valor para representar tanto os processos de evaporação do solo quanto a transpiração da cultura.

Contudo, uma gestão hídrica avançada requer uma visão mais detalhada. A abordagem do coeficiente dual ( $Kc = Kcb + Ke$ ) oferece essa granularidade, ao separar o coeficiente de transpiração basal (Kcb) do coeficiente de evaporação do solo (Ke) (Standard single and basal crop coefficients for field crops. Updates and advances to the FAO56 crop water requirements methodPereira *et al.*, 2021; Ramos *et al.*, 2023). Ao isolar a evaporação, a abordagem dual permite o desenvolvimento de estratégias de irrigação que mantêm parte da superfície do solo seca, controlando perdas não produtivas sem comprometer a transpiração essencial para o crescimento da planta (Allen *et al.*, 2005; Allen; Pereira, 2009; Li; Ma, 2019; Rosa *et al.*, 2012).

Para aplicar a abordagem do coeficiente dual de forma eficaz, modelos de simulação do balanço hídrico do solo são ferramentas. Dentre eles, o modelo SIMDualKc se destaca por sua capacidade de particionar diariamente a  $ET_c$ , tornando-se uma ferramenta avançada para otimizar calendários de irrigação e avaliar o estresse hídrico das culturas (Liu *et al.*, 2022; Pereira; Paredes; Jovanovic, 2020; Ramos *et al.*, 2023).

O modelo SIMDualKc, por exemplo, é uma ferramenta avançada para a estimativa da evapotranspiração de culturas ( $ET_c$ ) e o manejo eficiente da irrigação. Sua aplicação permite a realização de balanços hídricos precisos, fundamentais para o desenvolvimento do uso da água na agricultura (González *et al.*, 2015; Ramos *et al.*, 2023).

Várias aplicações do SIMDualKc são documentadas em diferentes locais ao redor do mundo, como a cultura do milho na planície de Hetao, na China (Liu *et al.*, 2022), culturas arbóreas no sul de Portugal (Ramos *et al.*, 2023), malva-juta na região de Akkar, na Síria (Darouich *et al.*, 2021), milho irrigado por gotejamento no Brasil (González *et al.*, 2015). Apesar de sua ampla validação, uma lacuna de conhecimento persiste para a beterraba de mesa (*Beta vulgaris* L.), conforme apontado na mais recente atualização dos coeficientes de cultura da FAO (PEREIRA *et al.*, 2021).

Considerando que a beterraba de mesa é produzida tanto para mercados frescos quanto para o processamento comercial e uso medicinal, e que desempenha um papel relevante na geração de renda dos agricultores em diversas regiões do mundo (Chen *et al.*, 2021; Sharma *et al.*, 2025), o objetivo desta pesquisa foi estimar a evaporação do solo e a transpiração da beterraba, cultivar Early Wonder (*Beta vulgaris* L.), utilizando o modelo SIMDualKc, a partir do balanço hídrico do solo para a cultura.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Área experimental

O estudo foi realizado em campo, na Área Experimental de Irrigação e Drenagem da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG (20°46' N e 42°51' O, a. s. l. 663). O solo da região é classificado como Latossolo vermelho-amarelo distrófico (FERNANDES FILHO, 2010) e possuía textura argilosa (APÊNDICE A e B). O clima da região é clima tropical de altitude, com distribuição de chuva entre os meses de outubro

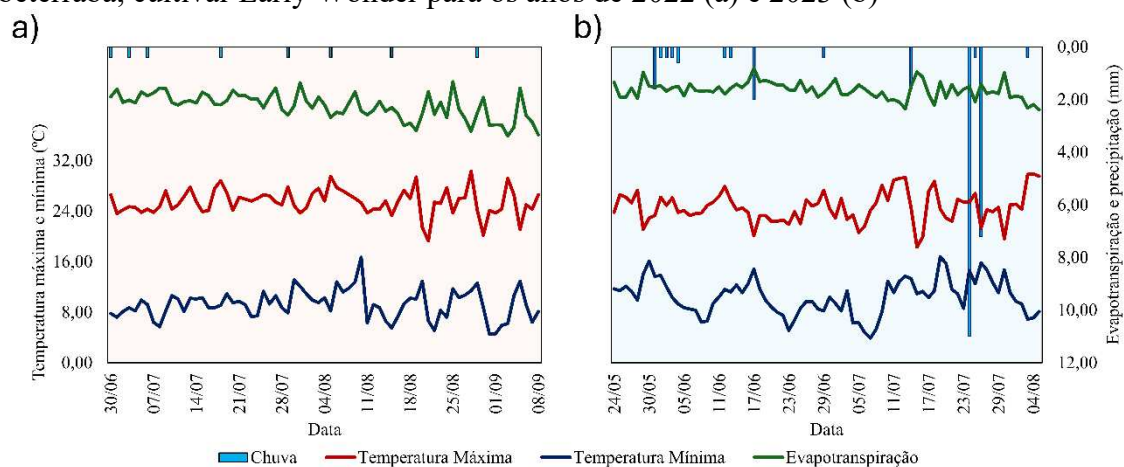
a maio, e com período seco de junho a setembro, De acordo com a classificação climática de Köppen, atualizada para o Brasil por Alvares *et al.* (2013), a região pertence ao tipo Cwa.

Durante os estudos, foram registradas temperaturas máximas de 30,30 °C (2022) e 20,50°C (2023), e mínimas de 4,50 °C (2022) e 10,46 °C (2023). A temperatura média variou entre 12,95 °C e 17,57 °C (Figura 1). A precipitação total acumulada durante o período experimental foi de 3,20 mm (2022) e 27,20 mm (2023), com uma evapotranspiração média de 2,25 mm (2022) e 1,64 mm (2023).

O solo utilizado no experimento é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico e caracterizado por análises física por Freitas *et al.* (2023). A análise química (APÊNDICE AAPÊNDICES

APÊNDICE A; Tabela 1) foi realizada antes do transplante e realizada a correção do pH por calagem e dos nutrientes nitrogênio, fosforo e potássio foi corrigido pela 5ª aproximação de Minas Gerais (Ribeiro; Guimarães; Alvarez, 1999).

**Figura 1.** Variação das temperaturas máxima e mínima (°C), precipitação pluviométrica acumulada (mm) e evapotranspiração de referência (mm) durante o período de cultivo da beterraba, cultivar Early Wonder para os anos de 2022 (a) e 2023 (b)



Fonte: Santos, L. A. (2025).

## 2.2 Condução experimental

Foi utilizado no experimento mudas da cultura da beterraba, cultivar Early Wonder, conhecida por ser amplamente difundida no Brasil e por suas características de produtividade precoce e resistência moderada a doenças. O espaçamento adotado na implantação da cultura em campo foi de 0,25 m entre linhas e 0,15 m entre plantas. A irrigação foi realizada por gotejamento, com um sistema composto por três linhas de

gotejadores espaçadas a 25 cm, garantindo a formação de bulbos molhados ao longo de cada linha de cultivo.

Foram utilizados dois ciclos de cultivo, realizados em 2022 e 2023 (Tabela 1), para a modelagem e calibração do modelo. Os experimentos tiveram início após o desbaste das mudas, realizado 10 dias após o transplante para o campo. As observações foram conduzidas em 14 canteiros, cada um com 0,9 m de largura e 10,0 m de comprimento. Foram realizados dois tratamentos de irrigação: irrigação plena (100% da evapotranspiração da cultura - ETc) e irrigação com 50% da ETc.

**Tabela 1.** Data e duração dos ciclos de desenvolvimento da cultura da beterraba, cultivar Early Wonder.

ANO	Duração do ciclo	Estádio de crescimento da cultura			
		Inicial	Desenvolvimento	Intermediária	Colheita
2022	Data	30/06 a 12/07	12/07 a 04/08	04/08 a 08/09	08/09
	Dias	12 dias	23 dias	35 dias	
2023	Data	24/05 a 06/06	06/06 a 29/06	29/06 a 05/08	05/08
	Dias	13 dias	23 dias	37 dias	

Indicação numérica das datas por dias e meses (DD/MM).

Fonte: Santos, L. A. (2025).

A fração de solo coberta ou sombreada pelo dossel da cultura foi estimada a partir dos dados da fração média de cobertura do solo por vegetação apresentados no Capítulo I (Tabela 2).

**Tabela 2.** Fração média da cobertura do solo coberta por vegetação (fc, %) em função dos dias de cultivo da beterraba, cultivar Early Wonder, para os anos de 2022 e 2023.

Dias	Ano		fc
	2022	2023	
1	30/06	24/05	6,5
17	17/07	10/06	26,5
27	27/07	20/06	60,4
36	05/08	29/06	83,6
46	15/08	09/07	90,6
56	25/08	19/07	94,5
66	04/09	29/07	90,7

Indicação numérica das datas por dias e meses (DD/MM).

Fonte: Santos, L. A. (2025).

### 2.3 Estimativa da lâmina de água e umidade do solo

Após o transplante das mudas, foi realizada uma lâmina de água igual para todos os tratamentos por 10 dias, a fim de garantir a adaptação da cultura ao campo e elevar o solo a capacidade de campo. Após este período, o manejo hídrico da cultura foi realizado pelo balanço de água, via clima. Para tal, foi realizado o controle diário de entrada e saída de água no sistema.

A necessidade de irrigação (IWR) foi quantificada pela diferença entre a evapotranspiração da cultura e a entrada de água proveniente da precipitação pluvial efetiva (mm) ou da irrigação (mm). As irrigações foram realizadas em turnos de 2 a 3 dias, permitindo o acúmulo de um volume mínimo de água para garantir a formação da faixa de irrigação na parcela experimental.

$$IWR = \frac{ETc - Pe}{Ei} \quad 1$$

Onde: IWR é a necessidade de irrigação, mm; ETc é a evapotranspiração da cultura, mm; Pe é a precipitação efetiva, mm; e Ei é a eficiência de irrigação, decimal.

A evapotranspiração da cultura foi estimada por meio da evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>), pelo coeficiente de cultura (Kc) da beterraba e os coeficientes de cultura para um sistema localizado (Allen *et al.*, 2006; Mantovani; Bernardo; Palaretti, 2009).

$$ETc = ET_0 \times Kc \times K_L \quad 2$$

Onde: ET<sub>0</sub> é a evapotranspiração de referência da estação meteorológica, mm; Kc é o coeficiente de cultura, adimensional; e K<sub>L</sub> é o coeficiente de ajuste da aplicação localizada de água, adimensional.

A ET<sub>0</sub> foi calculada pela equação de Penman-Monteith, modelo padrão da FAO 56. Os dados climatológicos utilizados eram oriundos de uma estação automática (Davis Vantage Pro II) instalada em uma área gramada a 50 metros do experimento. Foram utilizados os dados diários de temperatura máxima e mínima do ar (°C), umidade máxima e mínima relativa do ar (%), velocidade do vento a 2 metros (m/s), radiação solar (W/m<sup>2</sup>), e precipitação (mm).

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad 3$$

Onde:  $\Delta$  é a declividade da curva de pressão de vapor em relação a temperatura,  $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $R_n - G$  é o balanço líquido de energia disponível na superfície,  $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ;  $\gamma$  é o coeficiente psicrométrico,  $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $e_s - e_a$  representa o déficit de pressão de vapor do ar,  $\text{kPa}$ ; e  $T$  é a temperatura média do ar,  $^\circ\text{C}$ ;  $u_2$  é a velocidade do vento,  $\text{m s}^{-1}$ .

O  $K_c$  utilizado foi baseado nos valores atualizados por Pereira *et al.* (2021) para a cultura da beterraba de mesa. No entanto, as fases intermediária e final do coeficiente de cultivo foram padronizadas com a mesmo valor. Assim, os valores de  $K_c$  foram 0,50 para a fase inicial ( $K_{c_{ini}}$ ) e 1,05 para a fase intermediária ( $K_{c_{int}}$ )

O  $K_L$  adotado foi o proposto por Keller (1978), ao possuir melhor aplicabilidade para culturas com maior densidade de plantio, como a beterraba, segundo Mantovani *et al.*, 2009. A relação da área molhada pelo gotejador foi determinada em campo, sendo fixada em 75% do bulbo molhado. A área sombreada foi obtida a partir dos dados da Tabela 2, adotando-se na Equação 4 o maior dos valores.

$$K_L = A_{MS} + 0,15 (1 - A_{MS}) \quad 4$$

Onde:  $A_{MS}$  é a fração de área molhada pelo gotejador ou sombreada pela planta, decimal.

A irrigação foi realizada com alta frequência e baixa intensidade, de modo que as perdas de água por percolação profunda e escoamento superficial foram consideradas nulas. Além disso, devido à profundidade do lençol freático, o fluxo capilar ascendente foi desprezível. Assim, a eficiência de aplicação foi desconsiderada, e, como não houve perdas de água no trajeto até os gotejadores, a eficiência de condução também foi desprezada na equação. Dessa forma, a eficiência de irrigação foi igualada à eficiência de distribuição de água.

Foi aferida a eficiência do sistema de irrigação por gotejamento pelo método de Keller e Karmeli (1974), utilizando 16 pontos de coleta em cada tratamento e utilizando o coeficiente de uniformidade de distribuição para determinar a eficiência de irrigação.

A tensão do solo foi estimada por meio de tensiômetros instalados em cada parcela experimental, nas camadas entre 0 a 20 cm de profundidade. Para determinar a umidade do solo, utilizou-se a câmara de Richard para obter os teores de água correspondentes às

tensões de 10, 20, 33, 100 e 1500 kPa. Esses valores foram posteriormente convertidos para a umidade em campo por meio da curva característica de retenção de água no solo, utilizando o método de Van Genuchten.

## 2.4 SIMDualKc

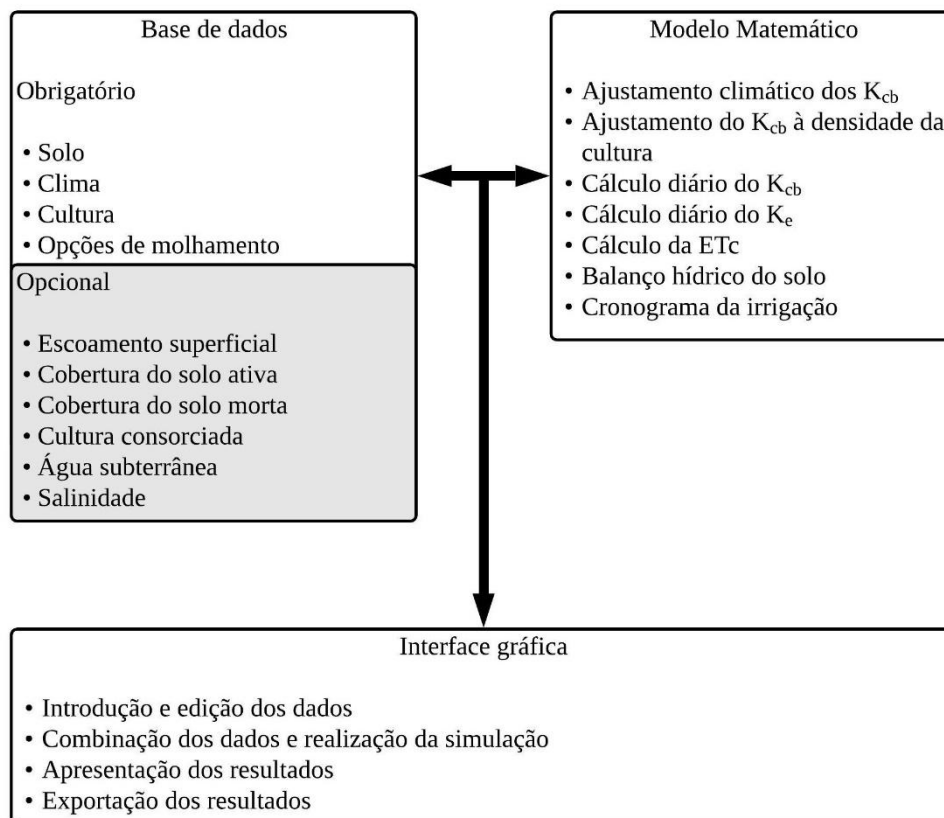
A modelagem SIMDualKc simula diferentes necessidades de irrigação ao realizar o balanço diário de água no solo em escala de campo (Equação 5), utilizando a abordagem do coeficiente da cultura duplo para estimar a evapotranspiração da cultura (Allen *et al.*, 1998; Rosa *et al.*, 2010). Assim, o modelo é utilizado para estimar a evaporação e transpiração das culturas, ao adotar a abordagem do coeficiente dual de cultivo para cultura. A simulação considera o esgotamento de água na zona radicular ao final de cada dia.

$$ET_c = ET_0 (K_{cb} + K_e) \quad 5$$

Em que:  $ET_c$  – evapotranspiração da cultura, mm/dia;  $ET_0$  – evapotranspiração de referência, mm/dia;  $K_{cb}$  – coeficiente basal da cultura, adimensional;  $K_e$  – coeficiente de evaporação do solo, adimensional.

O modelo SIMDualKc, detalhado por Rosa *et al.* (2012), descreve de forma abrangente as abordagens computacionais utilizadas, incluindo fluxogramas do modelo e os principais módulos computacionais. Os dados de entrada para este estudo foram organizados de acordo com o apêndice C.

Para a simulação foram utilizados os dados de solo, clima, cultura e irrigação (dados obrigatórios; Figura 2). Os dados opcionais não foram considerados, uma vez que o escoamento superficial foi considerado mínimo devido ao uso do sistema de irrigação localizado. Além disso, não houve cobertura de solo nem cultura consorciada, o lençol freático não exerceu efeito capilar até a zona radicular da cultura, e a água utilizada para irrigação era de boa qualidade.

**Figura 2.** Estrutura do SIMDualKc

Fonte: Santos, L. A. (2025).

Para calibração do sistema, foram adotadas as tendências observadas no Capítulo I e descritas na tabela Tabela 3 para o  $K_{cb}$  no tratamento com transpiração da cultura. Também foram utilizados os dados de comprimento de raiz e de desenvolvimento da cultura observados nos ciclos em campo no modelo SIMDualKc.

**Tabela 3.** Parâmetros padrão (iniciais) e calibrados usados com o modelo SIMDualKc.

	Inicial	Calibrado
Parâmetros da cultura		
Kcb ini	0,19	0,19
Kcb med	0,89	0,89
Kcb fin	0,89	0,89
p	0,70	0,60
Parâmetros de evaporação do solo		
TEW	50	30
TAW	0	10

Legenda:  $K_{cb}$  – coeficiente de cultura basal nas fases inicial (ini), média (med) e final (fin); p – fração de água para a ausência de estresse na cultura; TEW – água total evaporável; e TAW – água total disponível.

Fonte: Santos, L. A. (2025).

A fração de água para a ausência de estresse na cultura (p) foi adotada de modo a aproximar os valores simulados do teor de água no solo (ASW) aos dados observados em campo. O fator p é influenciado, entre outros fatores, pelo tipo de solo, sistema de irrigação e, no contexto atual do estudo, pelas taxas de evapotranspiração (SOUSA *et al.*, 2011).

Para a adequação do modelo aos dados simulados e observados de umidade do solo, a água facilmente evaporável (REW) e a água evaporável totalmente (TEW) foram ajustados de forma a maximizar a similaridade dos dados. TEW representa a profundidade máxima de água que pode ser armazenada e evaporada da camada de evaporação do solo quando esta está totalmente molhada, enquanto a REW corresponde à profundidade de água que pode ser evaporada sem restrições de disponibilidade de água (Allen *et al.*, 1998). Os parâmetros foram ajustados usando tentativa e erro até que os erros permanecessem mínimos e estáveis, conforme aplicado por Paredes *et al.* (2018).

## 2.5 Análise estatística

Para avaliar a precisão do ajuste do modelo aos valores observados dos teores de água no solo e aos resultados obtidos pelo modelo SIMDualKc, foram utilizados indicadores estatísticos (Hallak; Pereira Filho, 2011) os quais consistiram: Coeficiente de Determinação ( $r^2$ ); Erro Absoluto Médio (MAE); Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE); Erro de Viés Médio (BEM); e Eficiência de Nash–Sutcliffe (NSE).

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum(O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{[\sum(O_i - \bar{O})^2]^{0.5}[\sum(P_i - \bar{P})^2]^{0.5}} \right\}^2 \quad 6$$

$$MAE = \frac{\sum|O_i - P_i|}{n} \quad 7$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum(O_i - P_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad 8$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad 9$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum(O_i - P_i)^2}{\sum(O_i - \bar{O})^2} \quad 10$$

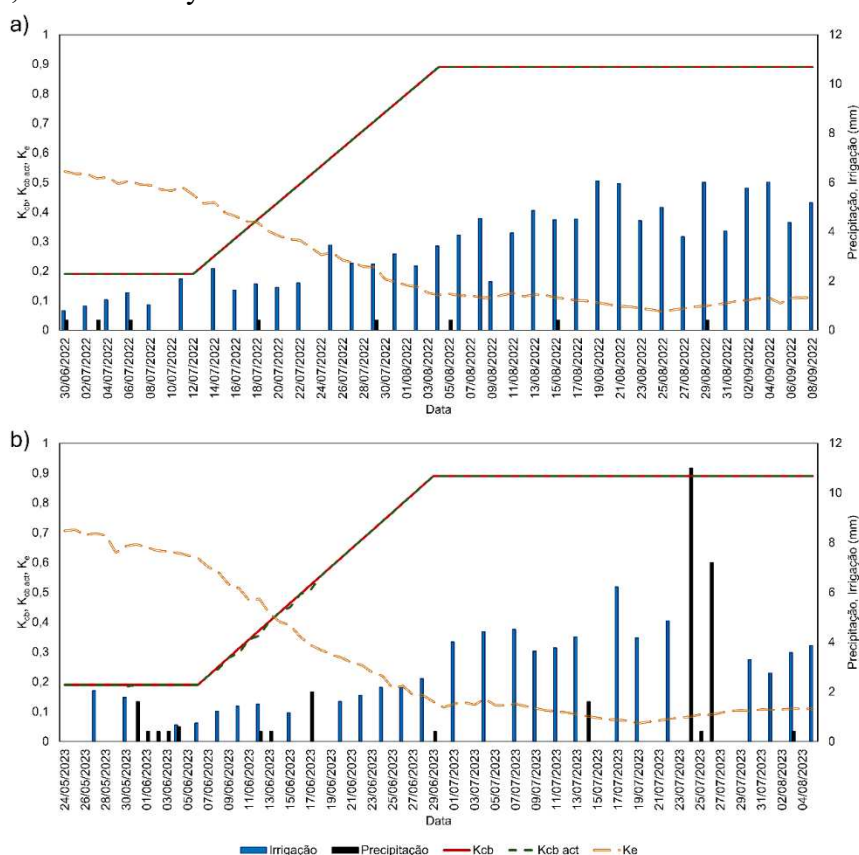
Onde  $O_i$  é o valor observado para uma determinada variável;  $P_i$  é o valor observado para uma determinada variável;  $i$  é o número da amostra;  $\bar{O}$  é o valor médio observado;  $\bar{P}$  é o valor médio predito; e  $n$  é o número de valores observados.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Coeficientes e evapotranspiração

Nas figuras Figura 3 e 4 são apresentadas as irrigações realizadas e precipitações que ocorreram no período de cultivo e as curvas do coeficiente de evaporação do solo ( $K_e$ ), coeficiente basal da cultura ( $K_{cb}$ ) e o coeficiente potencial basal da cultura ( $K_{cb}$  act) da beterraba, cultivar *Early Wonder*.

**Figura 3.** Variação diária dos coeficientes basal da cultura potencial ( $K_{cb}$ , —), basal da cultura real ( $K_{cb}$  act, - -) e evaporação ( $K_e$ , - - -), sob eventos de irrigações com 100% da demanda hídrica (■) e precipitações (■), para os anos de 2022 (a) e 2023 (b), para a beterraba, cultivar *Early Wonder*.

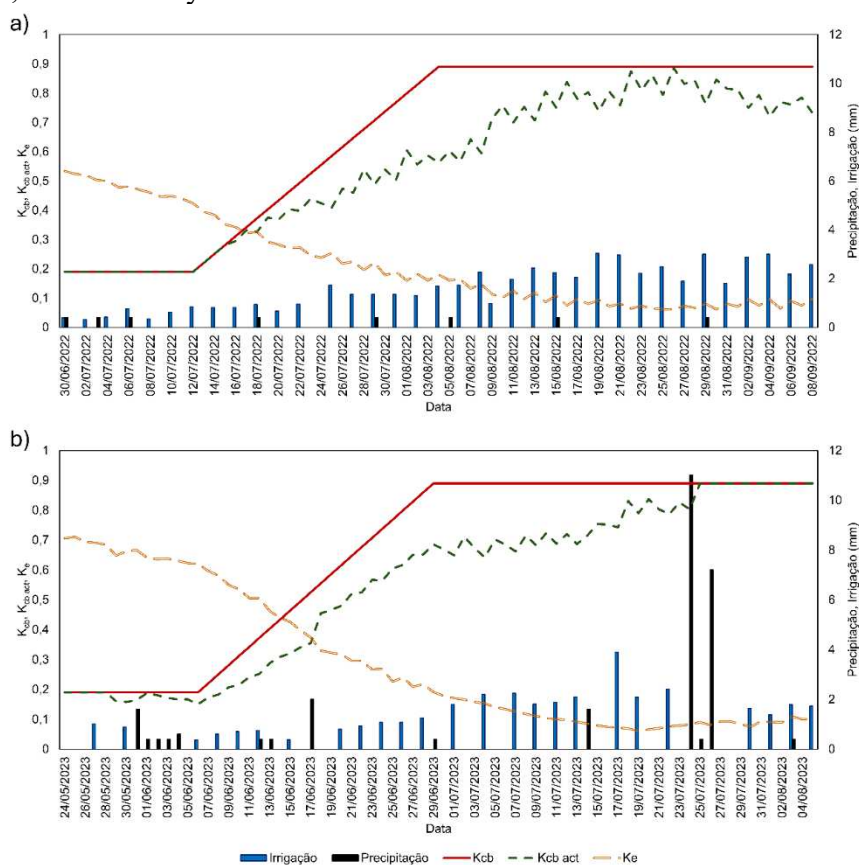


Fonte: Santos, L. A. (2025).

A figura Figura 3 representa a aproximação do modelo SIMDualKc para o cultivo com irrigação plena, suprindo 100% da evapotranspiração da cultura no sistema utilizado. Ela proporciona uma projeção mais precisa da demanda de água pela planta, uma vez que o Kcb ajustado pelo fator de estresse fica próximo ao Kcb da cultura.

A variação diária dos coeficientes basal da cultura (Kcb), basal da cultura ajustado ao estresse hídrico (Kcb act) e evaporação (Ke), sob eventos de irrigações e precipitações, nos anos de 2022 e 2023 (Fig. 4) resultou em uma curva uniforme, conforme o método FAO.

**Figura 4.** Variação diária dos coeficientes basal da cultura potencial (Kcb, —), basal da cultura real (Kcb act, - -) e evaporação (Ke, — o), sob eventos de irrigações com 50% da demanda hídrica (■) e precipitações (■), para os anos de 2022 (a) e 2023 (b), para a beterraba, cultivar Early Wonder.



Fonte: Santos, L. A. (2025).

Os valores de Kcb foram mais elevados durante a estação de crescimento, período em que a irrigação foi aplicada, refletindo a maior demanda hídrica da cultura. Esse comportamento está associado ao fato de o pico de crescimento da raiz tuberosa

coincidir com o maior desenvolvimento da parte aérea (Tullio *et al.*, 2013), evidenciando a integração entre os processos de crescimento e as necessidades hídricas

Entretanto, a observação dos dados no manejo com limitação hídrica (Fig. 4), utilizando 50% da demanda evapotranspirativa da cultura, evidenciou o  $K_{cb}$  ajustado pelo estresse se distancia do potencial pleno desenvolvimento da cultura.

A redução na transpiração da cultura tem menor impacto limitante nas lâminas de 50% durante a fase inicial da cultura, possivelmente porque é o momento em que a demanda de água para transpiração é menor. Nesse período, a evaporação da água do solo se torna o fator de maior influência na curva de  $K_c$  da cultura ( $K_c = K_{cb} + \overline{K_e}$ ).

Porém, na fase de rápida expansão e manutenção do crescimento da cultura, a transpiração real estimada da beterraba ( $K_{cb}$  act) demonstrou limitação para o desenvolvimento potencial que poderia ser alcançado. A evaporação do solo foi elevada na primeira parte do desenvolvimento da cultura, quando a fração de solo exposto era maior que a fração de área coberta pela vegetação ( $f_c$ ).

A limitação na transpiração da cultura pode comprometer a assimilação de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e a utilização da luz na fotossíntese, com a concomitante perda de água para o ambiente. Em condições de abundância hídrica e nutricional, as plantas tendem a apresentar crescimento acelerado, com o desenvolvimento de uma maior área foliar, o que resulta em maior interceptação de luz, incremento na assimilação de  $CO_2$  e intensificação da transpiração. Contudo, sob restrições hídricas prolongadas, as plantas podem sofrer desfolha e uma desaceleração do crescimento, limitando seu desenvolvimento a uma taxa compatível com a quantidade de água disponível na zona radicular (Werker; Jaggard, 1998).

Nos ambientes de estresse hídrico (50% da  $ET_c$ ), foi observado que, apesar da precipitação ser distribuída de forma desuniforme ao longo do ciclo, ela exerceu um efeito atenuador sobre a limitação de água no sistema (Fig. 4 b), implicando, ao final do ciclo, o retorno do  $K_{cb}$  act ao  $K_{cb}$  potencial.

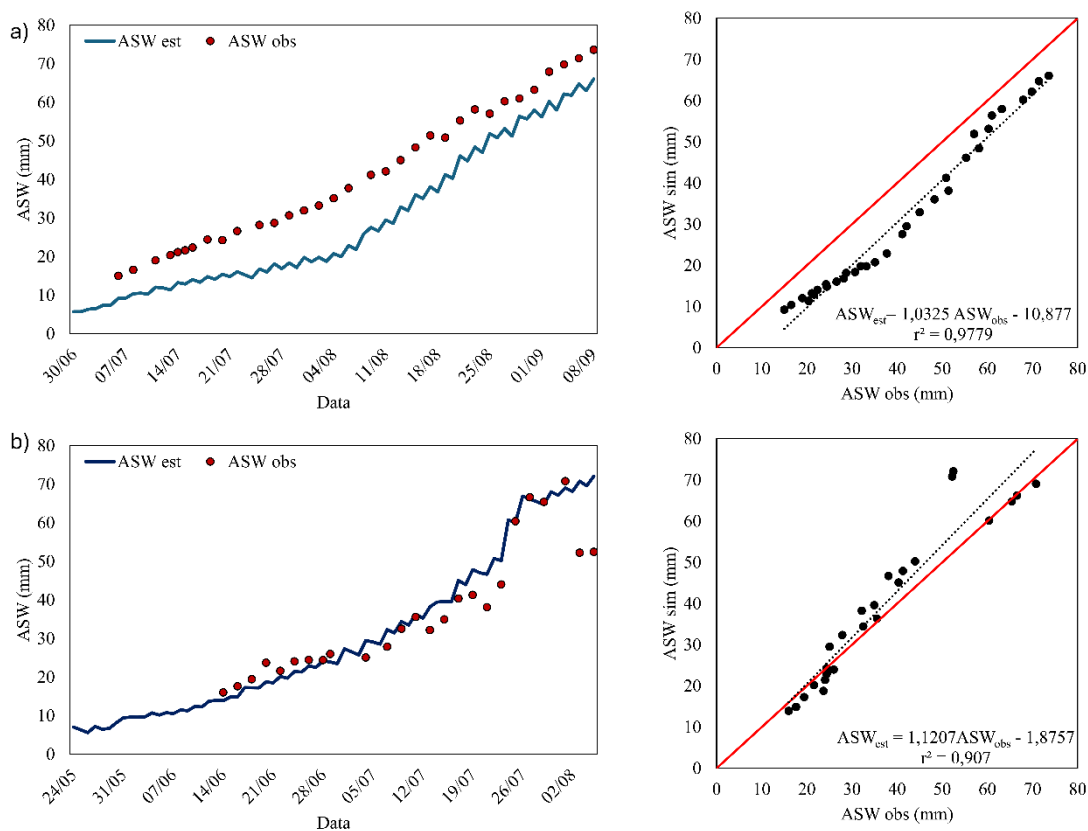
Vale ressaltar que a beterraba até a formação das primeiras folhas, tem o crescimento da raiz tuberosa de forma lenta, resultando em um acúmulo reduzido de fotoassimilados (Tullio *et al.*, 2013). Além disso, altos valores de índice de área foliar e sua duração podem melhorar a interceptação da radiação incidente sobre a cultura, contribuindo para o crescimento da raiz tuberosa (Tullio *et al.*, 2013).

### 3.2 Água disponível no solo

As figuras 5 e 6 comparam os valores observados e simulados do teor de água no solo ao longo do ciclo da cultura, tanto para o tratamento com irrigação de 100% da ETc, ou seja, sem estresse hídrico (nos anos de 2022 e 2023), quanto para o ciclo com irrigação de 50% da ETc (nos mesmos anos de 2022 e 2023).

Os valores simulados para o ano de 2022 (Fig. 5a e 6a), nos tratamentos com 100% e 50% da evapotranspiração da cultura, embora apresentem um alto coeficiente de correlação, demonstraram uma forte tendência a subestimar os valores observados em campo. Em média, os valores observados foram 43% superiores para o tratamento com 100% da ETc e 96% superiores para o tratamento com 50% da ETc, quando comparados com os valores simulados.

**Figura 5.** Variação da água disponível no solo estimada (ASW est) pelo SIMDualKc e a umidade do solo observada (ASW obs) em campo, para os anos de 2022 (a) e 2023 (b), para cultura da beterraba, cultivar Early Wonder, para o suprimento de 100% da evapotranspiração da cultura.



Fonte: Santos, L. A. (2025).

Os valores de RMSE foram menores em 2023 (especialmente para o tratamento de 100% da ETc), o que significa que os erros residuais entre os valores observados e os estimados pelo modelo foram menores. Para o tratamento de 50% da ETc, o RMSE foi relativamente mais alto, indicando uma maior dispersão dos erros.

**Tabela 4.** Indicadores da qualidade do ajuste do modelo para os valores de água disponível no solo observados no campo (ASW obs) e os estimados pelo modelo SIMDualKc (ASW est) fornecendo uma perspectiva sobre a interação do modelo ao gerar linhas de tendência, cultura da beterraba, cultivar Early Wonder.

ANO	Tratamento	Indicadores de qualidade do ajuste			
		MAE (mm)	RMSE (mm)	r <sup>2</sup>	EF
2022	100%	9,543	9,954	0,978	0,689
	50%	10,779	11,099	0,827	-3,453
2023	100%	4,380	6,547	0,907	0,831
	50%	4,351	5,004	0,928	0,751

Fonte: Santos, L. A. (2025)

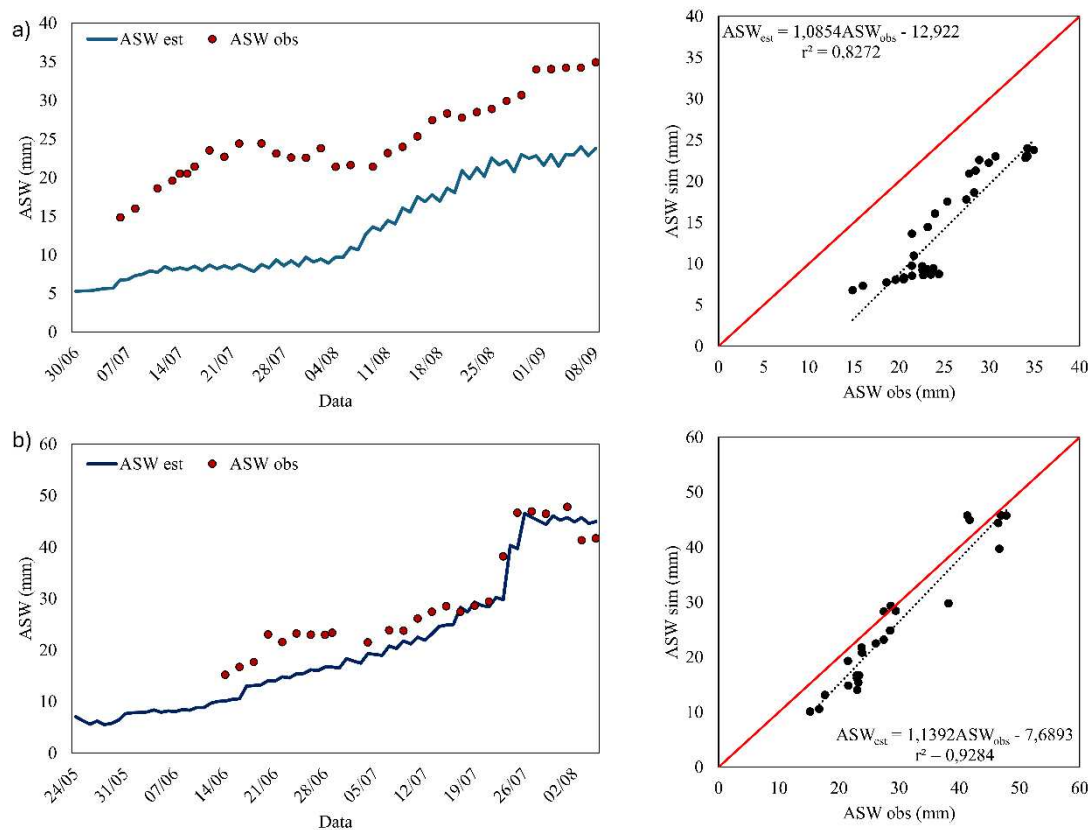
A eficiência do modelo (EF) foi mais baixa para o tratamento de 50% da ETc em 2022 (-3,453), indicando um ajuste muito ruim do modelo nessas condições. Isso reflete que o modelo teve um desempenho fraco sob estresse hídrico, que indica que o modelo não está ajustando melhor que a simples média dos dados observados. Em 2023, no entanto, a eficiência foi mais alta, com valores de EF de 0,831 para o tratamento de 100% da ETc e 0,751 para o tratamento de 50% da ETc, sugerindo uma melhoria na calibração e no ajuste do modelo em 2023.

Ramos et al. (2012) e Darouich et al. (2020), abordaram possíveis fontes de erro para explicar os desvios entre os teores de água do solo medidos e simulados em suas pesquisas. Algumas das sugestões incluem: entradas no modelo, erros na estrutura do modelo e imprecisões nas medições de campo. Algumas dessas causas também podem ser relevantes neste estudo, como a qualidade do conjunto de dados de medição, especialmente a representatividade dos teores de água do solo medidos ao longo de um determinado volume de solo com tensiômetros, para descrever adequadamente a distribuição da água em sistemas de irrigação localizado por gotejamento.

O SIMDualKc teve um desempenho muito bom na simulação de variação da água disponível no solo estimada nas parcelas com irrigação de 100% da evapotranspiração da

cultura. e 50% de lâmina para a safra de 2023 de beterraba, cultivar Early Wonder (Fig. 5b e 6b).

**Figura 6.** Variação da água disponível no solo estimada (ASW est) pelo SIMDualKc e a umidade do solo observada (ASW obs) em campo, para os anos de 2022 (a) e 2023 (b), para cultura da beterraba, cultivar Early Wonder, para o suprimento de 50% da evapotranspiração da cultura.



Fonte: Santos, L. A. (2025).

Resultados promissores foram encontrados para as observações de teor de água no solo foram descritos por Pereira et al. (2015) para cevada (*Hordeum vulgare* L.), Paredes et al., (2014) para o milho (*Zea mays* L.), Darouich et al. (2020) para abobrinha (*Curcubita pepo* L.) e culturas tuberosas como Paredes et al. (2018) para batata (*Solanum tuberosum* L.)

As beterrabas são plantas com necessidades hídricas médias, no entanto, durante a germinação e a fase inicial do seu desenvolvimento, requerem uma maior disponibilidade de água no solo para garantir uma germinação homogênea e um estabelecimento adequado da cultura. Após esse período crítico, a beterraba demonstra uma maior tolerância à deficiência hídrica, sendo menos sensível à falta de água em comparação com outras culturas de raízes (Székely; Máté, 2023).

Os componentes do uso da água estimados pelo SIMDualKc indicam que, durante o cultivo da beterraba, a precipitação foi inferior à evapotranspiração da cultura ajustada  $ET_{cact}$  nos tratamentos de 100% e 50% da  $ET_c$ , em ambos os anos. Isso reforça a necessidade de irrigação para a cultura da beterraba, conforme discutido anteriormente em relação à dinâmica da transpiração. Esses resultados corroboram os dados de Paredes et al. (2018) em sua avaliação da transpiração, produtividade e eficiência no uso da água da batata sob diferentes regimes hídricos.

Os valores do teor de água disponível no solo foram, no geral, superiores aos tratamentos com 100% da evapotranspiração da cultura nos que foram encontrados nos tratamentos com 50% da  $ET_c$ .

#### 4 CONCLUSÃO

O modelo SIMDualKc foi utilizado para estimar a evaporação do solo e a transpiração da beterraba, cultivar Early Wonder (*Beta vulgaris* L.), a partir do balanço hídrico do solo. A simulação foi realizada com êxito para dois ciclos de cultivo da beterraba e mostrou-se eficaz na simulação da dinâmica da água no solo, tanto em condições de irrigação plena (100% da  $ET_c$ ) quanto sob irrigação reduzida (50% da  $ET_c$ ). O modelo foi calibrado para o ano de 2022 e demonstrou precisão na validação no ano de 2023, conforme a avaliação dos indicadores estatísticos. A estimava da evaporação do solo e a transpiração da beterraba, utilizando o modelo SIMDualKc, no ciclo foi de evaporação do solo, transpiração e evapotranspiração.

#### REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G. *et al.* **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements** Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO. Rome: FAO, 1998.

ALLEN, R. G. *et al.* **Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. Rome: [s. n.], 2006. Disponível em: <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>. .

ALLEN, R. G. *et al.* FAO-56 Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [s. l.], v. 131, n. 1, p. 2–13, 2005. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9437%282005%29131%3A1%282%29>.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. **Irrigation Science**, [s. l.], v. 28, n. 1, p. 17–34, 2009. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00271-009-0182-z>.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em: [http://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen\\_s\\_climate\\_classification\\_map\\_for\\_Brazil?af=crossref](http://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen_s_climate_classification_map_for_Brazil?af=crossref).

ANA. **Atlas Irrigação 2021: Uso da Água na Agricultura Irrigada**. Brasília: [s. n.], 2021. Disponível em: [https://biblioteca.ana.gov.br/asp/download.asp?codigo=148256&tipo\\_midia=2&iIndexSrv=1&iUsuario=0&obra=88090&tipo=1&iBanner=0&iIdioma=0](https://biblioteca.ana.gov.br/asp/download.asp?codigo=148256&tipo_midia=2&iIndexSrv=1&iUsuario=0&obra=88090&tipo=1&iBanner=0&iIdioma=0).

CHEN, L. *et al.* Beetroot as a functional food with huge health benefits: Antioxidant, antitumor, physical function, and chronic metabolomics activity. **Food Science & Nutrition**, [s. l.], v. 9, n. 11, p. 6406–6420, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/fsn3.2577>.

DAROUICH, H. *et al.* Crop water requirements and crop coefficients for jute mallow (*Corchorus olitorius* L.) using the SIMDualKc model and assessing irrigation strategies for the Syrian Akkar region. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 255, p. 107038, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377421003036>.

DAROUICH, H. *et al.* Modeling Zucchini squash irrigation requirements in the Syrian Akkar region using the FAO56 dual-Kc approach. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 229, p. 105927, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377419313356>.

FAOSTAT. **Food and agriculture data**. [S. l.], 2022.

FERNANDES FILHO, E. I. (org.). **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais**. 1. ed. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010.

FREITAS, E. M. de *et al.* Evapotranspiration and crop coefficient of *Physalis peruviana* cultivated with recycled paper as mulch. **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 320, p. 112212, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304423823003837>.

GONZÁLEZ, M. G. *et al.* Modelling soil water dynamics of full and deficit drip irrigated maize cultivated under a rain shelter. **Biosystems Engineering**, [s. l.], v. 132, p. 1–18, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1537511015000203>.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 26, n. 4, p. 591–608, 2011. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-77862011000400009&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862011000400009&lng=pt&tlng=pt).

- HASHEMI, S.-Z. *et al.* Enhancing agricultural sustainability with water and crop management strategies in modern irrigation and drainage networks. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 305, p. 109110, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377424004463>.
- KELLER, J. Trickle Irrigation. *In*: USDA (org.). **National Engineering Handbook**. Glendora: Soil Conservation Service, 1978. p. 129.
- KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle Irrigation Design Parameters. **Transactions of the ASAE**, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 0678–0684, 1974. Disponível em: <http://elibrary.asabe.org/abstract.asp??JID=3&AID=36936&CID=t1974&v=17&i=4&T=1>.
- LI, F.; MA, Y. Evaluation of the Dual Crop Coefficient Approach in Estimating Evapotranspiration of Drip-Irrigated Summer Maize in Xinjiang, China. **Water**, [s. l.], v. 11, n. 5, p. 1053, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/5/1053>.
- LIU, M. *et al.* Impacts of a shallow saline water table on maize evapotranspiration and groundwater contribution using static water table lysimeters and the dual Kc water balance model SIMDualKc. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 273, p. 107887, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377422004346>.
- MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2009.
- PAREDES, P. *et al.* Assessing potato transpiration, yield and water productivity under various water regimes and planting dates using the FAO dual K c approach. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 195, p. 11–24, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377417303062>.
- PAREDES, P. *et al.* Partitioning evapotranspiration, yield prediction and economic returns of maize under various irrigation management strategies. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 135, p. 27–39, 2014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377413003521>.
- PEREIRA, L. S. *et al.* Modeling malt barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years. Assessing AquaCrop and SIMDualKc models. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 159, p. 239–254, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377415300238>.
- PEREIRA, L. S. *et al.* Standard single and basal crop coefficients for field crops. Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 243, p. 106466, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377419322590>.
- PEREIRA, L. S. *et al.* Standard single and basal crop coefficients for vegetable crops, an update of FAO56 crop water requirements approach. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 243, p. 106196, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377419321201>.

PEREIRA, L. S. *et al.* Prediction of crop coefficients from fraction of ground cover and height: Practical application to vegetable, field and fruit crops with focus on parameterization. **Agricultural Water Management**2, [s. l.], v. 252, n. 106663, p. 23, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106663>.

PEREIRA, L. S.; PAREDES, P.; JOVANOVIĆ, N. Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 241, p. 106357, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377420303930>. Acesso em: 25 mar. 2021.

RAMOS, T. B. *et al.* Two-dimensional modeling of water and nitrogen fate from sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 111, p. 87–104, 2012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377412001370>.

RAMOS, T. B. *et al.* Water use and soil water balance of Mediterranean tree crops assessed with the SIMDualKc model in orchards of southern Portugal. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 279, p. 108209, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377423000744>.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (org.). **5ª Aproximação - Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa, MG: UFV, 1999. Disponível em: <https://www.editoraufv.com.br/produto/5-aproximacao-recomendacoes-para-o-uso-de-corretivos-e-fertilizantes-em-minas-g/1109073>.

ROSA, R. D. *et al.* Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software: 2. Model testing. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 103, p. 62–77, 2012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377411002903>.

ROSA, R. D. *et al.* O MODELO SIMDualKc PARA A SIMULAÇÃO DA REGA E GERAÇÃO DE CALENDÁRIOS DE REGA. In: PEREIRA, L. S.; MEXIA, J. T.; PIRES, C. A. (org.). **Gestão do Risco em Seca. Métodos, Tecnologias e Desafios**. Colibried. [S. l.]: CEER, 2010. p. 279–300. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/289344790\\_O\\_MODELO\\_SIMDualKc\\_PARA\\_A\\_SIMULACAO\\_DA\\_REGA\\_E\\_GERACAO\\_DE\\_CALENDARIOS\\_DE\\_REGA](https://www.researchgate.net/publication/289344790_O_MODELO_SIMDualKc_PARA_A_SIMULACAO_DA_REGA_E_GERACAO_DE_CALENDARIOS_DE_REGA).

SHARMA, P. *et al.* Evaluation of foliar fungicides for Cercospora leaf spot management in table beet in New York. **Crop Protection**, [s. l.], v. 188, p. 107028, 2025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261219424004563>.

SOUSA, V. F. de *et al.* **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/907498>.

SZÉKELY, D.; MÁTÉ, M. Red Beetroot (Beta Vulgaris L.). In: **ADVANCES IN ROOT VEGETABLES RESEARCH**. [S. l.]: IntechOpen, 2023. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/83567>.

TULLIO, J. A. *et al.* Cultivo de beterraba em ambientes protegido e natural na época de verão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 17, n. 10, p. 1074–1079, 2013. Disponível em:  
[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662013001000008&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662013001000008&lng=pt&tlng=pt).

WERKER, A. R.; JAGGARD, K. W. Dependence of sugar beet yield on light interception and evapotranspiration. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 89, n. 3–4, p. 229–240, 1998. Disponível em:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192397000816>.

## APÊNDICES

APÊNDICE A. Análise química do solo utilizado no experimento em campo, na Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa, para os anos de 2022 e 2023.

Ano	Prof. (cm)	pH H <sub>2</sub> O	P	K	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H + Al	SB	t	T	V	P-Rem
			--- mg/dm <sup>3</sup> ---		----- Cmol/dm <sup>3</sup> -----						%	mg/L	
2022	0-20	5,52	28,3	141	2,94	0,75	0,0	3,3	4,05	4,05	7,35	55,1	32,7
	20-40	5,60	24,2	135	2,88	0,71	0,0	3,0	3,94	3,94	6,94	56,8	32,2
2023	0-20	5,51	30,2	79	7,31	0,66	0,0	3,5	3,75	3,75	7,25	51,7	31,6
	20-40	5,48	18,7	64	8,14	0,64	0,0	3,3	3,69	3,69	6,99	52,8	27,0

Fonte: Santos, L. A. (2025).

Legenda: Prof. – Profundidade do solo; SB – Soma de Bases Trocáveis; t – Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; T – Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; V – Índice de Saturação por Bases; e P-rem – Fósforo Remanescente.

APÊNDICE B. Análise física do solo utilizado no experimento em campo, na Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa.

Prof. (cm)	Areia grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Classificação textural (1)	Ds g/cm <sup>3</sup>	$\theta_{CC}$ ----- % -----	$\theta_{PM}$
	----- kg/kg -----							
0-20	0,254	0,104	0,139	0,503	Argila	1,08	36,88	19,51
20-40	0,242	0,107	0,130	0,521		1,21	40,90	20,44

Fonte: Santos, L. A. (2025); (1) SBCS (Triângulo textural)

Legenda: Prof. – Profundidade do solo; Ds – Densidade aparente do solo;  $\theta_{CC}$  – teor de água no solo na capacidade de campo; e  $\theta_{PM}$  – teor de água no solo no ponto de murcha.

APÊNDICE C. Organização da obtenção dos dados para alimentar o modelo SIMDualKc para a cultura da beterraba, cultivar Early Wonder.

Categoria	Dados	Fontes
Dados climáticos	Temperaturas do ar máximas e mínimas diárias ( $^{\circ}\text{C}$ ); Radiação solar ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ); Velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ); Umidade relativa do ar máximas e mínimas diárias (%); Precipitação (mm); e $\text{ET}_o$ ( $\text{mm dia}^{-1}$ );	Dados da Estação meteorológica presente na área experimental.
Dados do solo	Número de camadas do solo (unid); Profundidades das camadas do solo (m); Valores para $\theta_{\text{FC}}$ ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e $\theta_{\text{WP}}$ ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ); e Dados de granulometria (%).	Dados do solo área experimental; Avaliação de curva características de água no solo e granulometria.
Parâmetros de evaporação do solo	Profundidade da camada de evaporação ( $Z_e$ , m); Profundidades máximas e facilmente evaporáveis; TEW e REW (mm).	Estimados pelo SIMDualKc; Calibração do modelo.
Dados da Cultura	Datas que definem os estágios da safra; Coeficientes de cultura basais para a estação inicial, intermediária e final ( $K_{\text{cb ini}}$ , $K_{\text{cb med}}$ e $K_{\text{cb fin}}$ ); Frações de depleção de água no solo para nenhum estresse nos estádios supracitados ( $p_{\text{ini}}$ , $p_{\text{med}}$ e $p_{\text{fin}}$ ); Profundidade da raiz ( $Z_r$ , m); $f_c$ (adimensional).	Observações no campo experimental; Calibração do modelo.
Dados de irrigação	Referentes às datas e lâminas de irrigação e à fração da superfície do solo umedecida pela irrigação ( $f_w$ , não dimensional).	Execução e observações em campo experimental.

Fonte: Santos, L. A. (2025)