

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA - UFSM
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA -
PPGEA**

Cassiane Rodrigues Rosário

**CONSUMO DE ÁGUA E COMPONENTES DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DO TRIGO EM DIFERENTES
CENÁRIOS CLIMÁTICOS: UMA APROXIMAÇÃO AO MODELO
SIMDUALKC**

Santa Maria, RS
2019

Cassiane Rodrigues Rosário

**CONSUMO DE ÁGUA E COMPONENTES DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA
CULTURA DO TRIGO EM DIFERENTES CENÁRIOS CLIMÁTICOS: UMA
APROXIMAÇÃO AO MODELO SIMDUALKC**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Orientador: Mirta Teresinha Petry

Santa Maria, RS
2019

Rosário, Cassiane

Consumo de água e componentes da evapotranspiração da cultura do trigo em diferentes cenários climáticos: uma aproximação ao modelo SIMDualKc / Cassiane Rosário. - 2019.

75 p.; 30 cm

Orientador: Mirta Teresinha Petry

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2019

1. Balanço hídrico do solo. 2. SIMDualKc 3. Cenários I. Petry, Mirta Teresinha II. Título.

© 2019

Todos os direitos autorais reservados a Cassiane Rodrigues Rosário. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: cassiane.rodrigues.rosario@gmail.com

Cassiane Rodrigues Rosário

**CONSUMO DE ÁGUA E COMPONENTES DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA
CULTURA DO TRIGO EM DIFERENTES CENÁRIOS CLIMÁTICOS: UMA
APROXIMAÇÃO AO MODELO SIMDUALKC**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Aprovado em 8 de março de 2019:

Mirta Teresinha Petry, Dra. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Nereu Augusto Streck, PhD. (UFSM)

Geraldo José Rodrigues Dr. (IFSC)

Santa Maria, RS
2019

Dedico essa conquista, a minha querida mãe Liete,

Ao meu eterno pai Valtair (in memoriam)

Aos meus irmãos Cassiano e Alisson,

e a minha amada Vó Marina (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por estar sempre ao meu lado em todos os momentos da minha vida.

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Centro de Ciências Rurais e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar o curso de mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos do mestrado.

À professora Mirta Petry pela orientação, amizade e ensinamentos.

Aos meus amados pais Liete e Valtair (*in memorian*), principalmente, minha mãe, que mesmo com todas as dificuldades, nunca mediram esforços para me dar uma educação melhor, que sempre me apoiaram e incentivaram na busca dos meus sonhos e conquistas, só me resta o meu sincero muito obrigada e meu eterno amor.

À minha doce e meiga Vó Marina (*in memorian*), por tudo que me ensinou e todo amor.

Aos meus irmãos Alisson e Cassiano, pelo apoio, carinho e companheirismo.

Aos meus padrinhos Wilson e Ana, por serem os melhores “segundo pais” durante toda minha vida, por todas as demonstrações de amor e carinho.

Aos meus queridos tios Valdir e Jussara e sua família, por sempre me estenderem a mão, não somente com abrigo de sua casa, mas também com carinho, alegria e muito afeto.

Aos meus tios João, Ledi, Lenir, Marlene, Luiz, Ledonir e Antônio (*in Memoriam*) e seus esposos(as), por sempre me darem muito carinho e apoio em toda minha vida.

A todos os meus primos, que são os melhores, por todos os momentos vividos juntos.

À minha amiga Denise pela grande amizade e confidências vividas.

Aos meus colegas do Sistema Irriga®: Hezer Gomes, Andressa Fuzer, Cassio Ferrazza, Diego Londero, Mariana Wruck, Giovana Pereira, Mateus Rodrigues, Luiz Felipe Sarmento. Aos colegas de Pós-Graduação: Robson Giacomelli, Lethícia Neto, Carlos Almeida, Lueni Terra, Max Dantas, Bruno Montovanelli pela amizade, risadas, ensinamentos e convivência ao longo desses anos. Em especial ao Leonardo Chechi, por toda a ajuda na elaboração da dissertação, a Jéssica Iensen e Marília Antonello pela amizade e cumplicidade.

Aos Engenheiros Agrônomos Cleiton Dalla Santa e Gabriel Spoloar (grande amigo), pela ajuda nos dados referente ao estudo em Goiás. Ao Douglas Haubert, pela ajuda e amizade.

E a todos aqueles me incentivaram, torceram e me incentivaram para realização deste trabalho e em toda minha vida.

Meu sincero muito obrigado!

*“A coisa mais indispensável a um homem,
é reconhecer o uso de que deve fazer
do seu próprio conhecimento”.*

(Platão)

RESUMO

CONSUMO DE ÁGUA E COMPONENTES DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DO TRIGO EM DIFERENTES CENÁRIOS CLIMÁTICOS: UMA APROXIMAÇÃO AO MODELO SIMDUALKC

AUTORA: Cassiane Rodrigues Rosário

ORIENTADOR(a): Mirta Teresinha Petry

A água é um fator abiótico, essencial em diversos processos biológicos, fisiológicos e químicos das plantas em geral, interferindo diretamente no potencial produtivo das culturas. Assim, quantificar a demanda hídrica da cultura, a fim de evitar perdas por déficit hídrico, principalmente nos estádios fenológicos que afetam diretamente a produtividade e a qualidade dos grãos, se faz necessário. Os objetivos deste estudo foram: (a) avaliar o balanço hídrico durante o ciclo da cultura do trigo cultivado em dois cenários climáticos (temperado e tropical), visando identificar a ocorrência de stress hídrico no período em que o rendimento e qualidade dos grãos são afetados; (b) calibrar e validar o modelo de balanço hídrico SIMDualKc para estimar a evapotranspiração (ET_c) e a evaporação do solo (E_s) durante o ciclo de desenvolvimento do trigo e; (c) avaliar o consumo de água e rendimento de grãos da cultura do trigo em cenários de clima seco e úmido, incluindo a derivação dos coeficientes de cultura basal (K_{cb}), de acordo com variabilidade climática de cada local. Estudos de campo foram conduzidos em região seca (Cerrado - cenário I) e úmida (Santa Maria - cenário II), com a cultura do trigo, irrigada por aspersão, nas safras agrícolas de 2017 e 2018. Utilizou-se o modelo de balanço hídrico SIMDualKc, para simular o balanço hídrico do solo em ambos os cenários. Os resultados demonstraram boa concordância entre os valores observados e simulados de água disponível no solo (ASW), com um coeficiente de regressão (b_0) de 1,00 e 0,99 para o Cenário I e II, respectivamente, um coeficiente de determinação (R^2) igual a 1,00 e um RMSE médio de 4,90 mm. Os valores de K_{cb} calibrados e validados foram de 0,1 e 0,15 para a fase inicial ($K_{cb\ ini}$), 0,9 e 1,0 para a fase intermediária ($K_{cb\ mid}$) e, na fase final, os valores foram de 0,25 para os cenários I e II, respectivamente. O resultado do balanço hídrico demonstrou que o trigo cultivado no Cerrado brasileiro (clima seco) apresentou maior consumo de água (ET_c), quando comparado com a região Sul (clima úmido). Um leve déficit hídrico foi observado no ano de 2017, no estágio fenológico reprodutivo, nas duas áreas estudadas, período em que ocorre maior demanda hídrica da cultura, o que acarretou em redução no rendimento de grãos. O modelo SIMDualKc apresentou-se como uma ferramenta apropriada para a calendarização e manejo de eventos de irrigação, assim como, para a melhoria na produtividade da água para a cultura do trigo em cenários climáticos contrastantes no Brasil.

Palavras-chave: Balanço hídrico do solo. Modelo SIMDualK. Coeficientes culturais duais. Evaporação do solo, Transpiração da cultura.

ABSTRACT

WATER CONSUMPTION AND EVAPOTRANSPIRATION COMPONENTS OF WHEAT CROP IN DIFFERENT CLIMATE SCENARIOS: AN APPROXIMATION OF THE SIMDUALKC MODEL

AUTHOR: Cassiane Rodrigues Rosário

ADVISOR: Mirta Teresinha Petry

Water is an abiotic factor, essential in several biological, physiological and chemical processes of plants in general, directly interfering in crops potential yield. Thus, quantifying the plant water requirements in order to avoid losses due to water deficit, especially in the phenological stages that directly affect productivity and grain quality, is necessary. The objectives of this study were: (a) to evaluate the soil water balance during the whole crop cycle of wheat in two climatic scenarios (temperate and tropical), aiming to identify the occurrence of water stress in the period in which yield and grain quality are affected and (b) to calibrate and validate the SIMDualKc soil water balance model to estimate evapotranspiration (ETc) and soil evaporation (Es) during the wheat development cycle and; (c) to evaluate water use and wheat crop grain yield in dry and humid climate scenarios, including the derivation of the basal crop coefficients (Kcb), according to climatic variability of each site. Field studies were carried out in a dry (Cerrado - Scenario I) and wet (Santa Maria - Scenario II) region, using wheat, irrigated by sprinkling, in the 2017 and 2018 crop growing seasons. The water balance model SIMDualKc was used to simulate soil water balance in both scenarios. The results showed good agreement between the observed and simulated values of soil available water (ASW), with a regression coefficient (b0) ranging from 1.00 to 0.99 for Scenario I and II, respectively, a coefficient of determination (R²) equal of 1.00 and an average RMSE (root mean square error) of 4.90 mm. The calibrated and validated Kcb values were 0.1 and 0.15 for the initial phase (Kcb ini), 0.9 and 1.0 for the intermediate phase (Kcb mid) and, in the final stages, the values were 0.25 for both scenarios. The result of the soil water balance showed that wheat cultivated in the Brazilian Cerrado (dry climate) presented higher water use (ETc), when compared to wheat cropped in the South region (humid climate). A slight water deficit was observed in the 2017 growing season, nearly at the end of the reproductive stage, in both areas, stage as there is a higher crop water demand, which resulted in a reduction in grain yield. Results also had shown that the SIMDualKc model was an appropriate tool for scheduling and management the irrigation events, as well as for improving crop and water productivity upon wheat in contrasting climatic scenarios in Brazil.

Keywords: Soil water balance. SIMDualKc model. Dual crop coefficients. Soil evaporation. Crop transpiration.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1- Localização e foto aérea da sede da Fazenda Pamplona, Cristalina-GO, com destaque para áreas 1,2,3,4.....28
- Figura 2- Temperatura máxima (—, °C) e mínima (—, °C) e precipitação pluvial(■, mm)(a e b), radiação solar (...., MJ/m²) , evapotranspiração de referência (—, mm) diários durante o período de cultivo de 2017e 2018 no cenário I.....47
- Figura 3- Temperatura máxima (—, °C), temperatura mínima (—, °C e precipitação pluvial(■, mm)(a), radiação solar (...., MJ/m²) e evapotranspiração de referência (— ET_o, mm)(b) dados diários durante o período de cultivo no cenário I.....48
- Figura 4- Comparação diária entre a água disponível no solo (ASW, mm) observada e simulada, para áreas a)1, b)2, c)3, d)4 em Cristalina (GO), e cenário II em Santa Maria(RS) com a cultura do trigo, sendo ● dados observados e — dados simulados, as colunas representam (■ irrigações, mm) e (■ precipitação, mm). As linhas horizontais representam o total de água disponível no solo (...., TAW, mm),e a água prontamente disponível no solo (....., RAW, mm), em Cristalina (GO) e Santa Maria (RS) nos anos de (2017) e (2018).....49
- Figura 5- Variação diária do coeficiente de cultura basal (K_{cb}, —), coeficiente de cultura basal ajustado (K_{cb act}, ---), coeficiente de evaporação (K_e, —), coeficiente de cultura ajustado (K_{c act}, —), coeficiente basal por VI (K_{cb},)VI, ao longo do ciclo da cultura do trigo, para a) 1, b) 2, c) 3 e d) 4, e e) cenárioII.....53
- Figura 6- Variação diária da evaporação do solo (E_s, mm, —) e transpiração da cultura (T_c, mm, —) do trigo, simulado pelo modelo SIMDualKc nas áreas 1(a), 2(b), 3(c) e 4(d) no cenário climático I, e no cenário climático II(e).....56
- Figura 7- Relação entre rendimento de grãos (kg há⁻¹) e transpiração do trigo para os diferentes cenários climáticos avaliados.....60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Coordenadas geográficas, altitude média, lâmina mínima, tempo de rotação, áreas 1,2,3 e 4 nos anos de 2017 e 2018.....	28
Tabela 2 –	Propriedades físico-hídricas das áreas irrigadas 1, 2, 3, 4, no Cenário I.	30
Tabela 3 –	Propriedades físico-hídricas da área experimental do Sistema Irriga®– DER/UFMS, Santa Maria – RS, 2018.....	34
Tabela 4 –	Datas das imagens utilizadas, em dias livres de coberturas de nuvens durante o ciclo de desenvolvimento do trigo no Cenário I.....	37
Tabela 5 –	Parâmetros utilizados para fração de cobertura do solo com índice de vegetação.....	39
Tabela 6 –	Datas das irrigações e lâminas brutas aplicadas (mm) durante o ciclo da cultura do trigo nos anos agrícolas de e 2018	41
Tabela 7 –	Datas dos estádios de desenvolvimento da cultura nos anos de 2017 e 2018.....	42
Tabela 8 -	Altura de plantas (h) e fração de cobertura do solo pelo dossel (fc) durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do trigo.....	43
Tabela 9 –	Coefficientes de cultura basal (K_{cb}), fração de depleção sem stress(p) e parâmetros de evaporação de água no solo, escoamento superficial e percolação profunda, padronizados e calibrados para áreas 1,2,3,4 e II	44
Tabela 10 -	Indicadores estatísticos relativo a quantidade de água no solo para área 1,2,3,4 e cenário II, com bases nas simulações usando o modelo SIMDualKc.....	51
Tabela 11 -	Indicadores para correlação entre os coeficientes de cultura basal simulado com SIMDualKc e estimado com índice de vegetação (K_{cbVI}).....	55
Tabela 12 -	Evaporação da água do solo (E_s , mm), e transpiração da cultura (T_{act} ,mm) para cada estádio de desenvolvimento da cultura do trigo, (2017 e 2018), em Goiás(GO), (2018) e cenário II, em Santa Maria(RS).....	57
Tabela 13-	Componentes do balanço hídrico para as áreas do cenário I e II	59
Tabela 14 -	Rendimento de grãos de trigo (kg /ha^{-1}), irrigações aplicadas (mm), precipitações (mm), produtividade total da água (WP Total, / $kg m^{-1}$ e produtividade total da água de irrigação (WP _{IRRIG} , / $kg m^{-3}$) relativas as áreas 1,2,3,4, e cenário II	62

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS*

AAE	Erro médio absoluto
a e b	Parâmetros da equação de percolação proposto por Liu et al, (2006)
ASW	Água disponível no solo (mm)
b ₂	Coefficiente de regressão
CN	Curva número
DAS	Dias após a semeadura
EF	Eficiência da modelagem
E _s	Evaporação da água do solo (mm)
ET _c	Evaporação da cultura (mm)
ET _o	Evaporação de referência (mm)
F _c	Fração de solo coberto pelo dossel vegetativo
H	Altura de plantas (m)
IC	Índice de colheita
K _c	Coefficiente de cultura
K _{cb}	Coefficiente de cultura basal no K _c dual
K _{c act}	Coefficiente de cultura ajustado (K _{cb} K _s +K _e)
K _{cb end}	K _{cb} para o período final de desenvolvimento da cultura
K _{cb ini}	K _{cb} para o período inicial de desenvolvimento da cultura
K _{cb mid}	K _{cb} para o período intermediário de desenvolvimento da cultura
K _{cb VI}	Coefficiente basal de cultura determinado por índice de vegetação
K _d	Coefficiente de densidade da cultura
K _e	Coefficiente de evaporação no K _c dual
K _s	Coefficiente de stress no K _c dual
IAF	Índice de área foliar
IWU	Uso total de água de irrigação(m ³)
NDVI	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada
O _i	Valores de água no solo observados (mm)
P _i	Valores de água no solo simulados (mm)
P	Fração de depleção de água do solo para condições sem stress
PBIAS	Porcentagem de viés
R ₂	Coefficiente de determinação
RAW	Água prontamente disponível do solo (mm)
REW	Água prontamente evaporável (mm)
RMSE	Raiz quadrada do erro médio
TAW	Água total disponível do solo (mm)
TEW	Água total evaporável(mm)
TWU	Uso total de água (m ⁻³)
T _c	Transpiração da cultura (mm)
Z _e	Espessura da camada com água evaporável (m)
Z _r	Comprimento radicular (m)
Y _a	Produtividade observada (Kg)
WP	Produtividade total da água (Kg m ⁻³)
WP _{irrig}	Produtividade da água de irrigação (Kg m ⁻³)

*As siglas e abreviaturas foram utilizadas em inglês, seguindo recomendação da FAO (Allen et al. 1998), visando evitar erros em simbologias e nomenclaturas normalmente observados em traduções para o idioma local.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVOS.....	17
2.1 OBJETIVO GERAL.....	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	18
3.1 A CULTURA DO TRIGO.....	18
3.2 BALANÇO HÍDRICO DO SOLO.....	20
3.3 MODELO DE SIMULAÇÃO DE BALANÇO HÍDRICO NO SOLO.....	22
3.3.10 modelo SIMDualKc.....	23
3.4 RENDIMENTO DA CULTURA.....	25
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	27
4.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DO ESTUDO.....	27
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO CENÁRIO I.....	27
4.2.1 Descrição da área.....	27
4.2.2 Descrição do estudo.....	28
4.2.3 Obtenção de dados meteorológicos.....	29
4.2.4 Características físicas e hidráulicas	29
4.2.5 Conteúdo de água no solo e manejo de irrigação.....	30
4.2.6 Implantação e manejo da cultura.....	31
4.2.7 Determinações fenológicas e morfológicas.....	31
4.2.8 Determinação do rendimento de grãos da cultura do trigo.....	32
4.2.9 Índice de colheita	32
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO NO CENÁRIO II.....	33
4.3.1 Descrição da área	33
4.3.2 Obtenção de dados meteorológicos.....	33
4.3.3 Determinações físicas e hidráulicas.....	33
4.3.4 Conteúdo de água no solo.....	34
4.3.5 Implantação e manejo da cultura.....	35
4.3.6 Determinações morfológicas e fenológicas	35
4.3.7 Determinação do índice de cobertura vegetal.....	36
4.3.8 Determinação do rendimento de grãos da cultura do trigo.....	36
4.3.9 Determinação dos coeficientes de cultura basal.....	36

4.4 SIMULAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO.....	39
4.5 PRODUTIVIDADE DA ÁGUA (WP).....	44
4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	45
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
5.1 VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS.....	47
5.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DA MODELAGEM DE ÁGUA NO SOLO.....	48
5.3 COEFICIENTES DE CULTURA.....	52
5.4 EVAPORAÇÃO DO SOLO E TRANSPIRAÇÃO DA CULTURA.....	55
5.5 COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO E USO DA ÁGUA.....	58
5.6 OBSERVAÇÕES E PREDIÇÕES DO RENDIMENTO.....	59
5.7 PRODUTIVIDADE DA ÁGUA(WP).....	61
5.8 ÍNDICE DE COLHEITA (IC).....	62
6 CONCLUSÃO.....	64
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
APÊNDICES.....	74

1 INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum aestivum*) é a mais importante cultura alimentar do mundo, em termos de área e produção, podendo ser cultivado nas mais variadas condições de topografia, solo e meteorológicas. De acordo com a FAOSTAT (2018), a China é a maior produtora mundial, em área e produto. A produção mundial é estimada em 750 milhões de toneladas para a safra 2018/19, de acordo com o relatório da USDA (2018). No Brasil, a produção é inferior a 5 milhões de toneladas, menos da metade do consumo interno (CONAB, 2019).

O trigo é considerado um cereal básico na dieta da população humana e fonte de alimento para animais, devido ao seu alto valor nutricional, composto de proteínas e carboidratos (DINU et al., 2018). A importância econômica e social da cultura é complexa, dada a sua relevância em muitas cadeias produtivas, o que exige políticas públicas que possibilitem condições de desenvolvimento e produção, incluindo a comercialização do produto. Talvez por isso o trigo seja uma das culturas mais estudadas pela pesquisa científica, no que tange ao melhoramento genético, manejo e ambientação de novas cultivares a diferentes locais de produção.

O Brasil possui grande potencial de expansão de produção e consumo de trigo, devido ao diversificado uso, já que a produção desse cereal contribui para a economia do país e sua importância na produção de alimentos resulta em futuros investimentos no seu cultivo. Além do cenário econômico, o trigo ocupa papel relevante no cenário ambiental, possibilitando a diversificação da atividade agrícola, sendo importante para a sustentabilidade da agricultura.

Geralmente, o cereal é cultivado durante a safra de inverno, sendo a região sul a principal produtora do país, representando 87% da produção nacional. Rio Grande do Sul e Paraná são os maiores produtores (IBGE, 2017). Entretanto, devido a necessidade de aumentar a produção interna de trigo e, assim, obter maior segurança alimentar, recentemente a região do cerrado brasileiro surgiu como alternativa de produção, visando aumentar os índices de produção do trigo, pois apresenta condições climáticas favoráveis, como estações seca e chuvosa bem definidas, e grande potencial de expansão, que colabora para implantação e desenvolvimento da cultura.

No Brasil, o trigo é cultivado em três regiões: a sul-brasileira (RS e SC), a Centro-Sul-Brasileira (PR, MS e SP) e Centro-Brasileira (GO, DF, MG, MT e BA), podendo também ser dividida em função do regime de chuvas, com uma região úmida e outra quente e seca

(CUNHA et al. 2006). A região úmida se entende do extremo Sul até o Norte do Paraná, e se caracteriza por apresentar precipitação total maior que a evapotranspiração da cultura, enquanto nas demais regiões, o clima é quente e moderadamente seco a muito seco, onde o cultivo sem irrigação é inviável técnica e economicamente.

O requerimento hídrico durante o ciclo de cultivo varia entre 450 a 650 mm, sendo que esses valores podem oscilar de acordo com o clima e duração do ciclo (DOORENBOS E KASSAM, 1979). Neste contexto, a água destaca-se como o principal fator abiótico que afeta as culturas em qualquer fase de desenvolvimento, por ser um elemento essencial em diversos processos biológicos, fisiológicos e químicos, interferindo diretamente no rendimento da cultura. Assim, para que o potencial produtivo das culturas agrícolas seja atingido há uma necessidade de se realizar irrigações plenas ou suplementares como alternativa devido as incertezas das quantidades de chuvas de sua distribuição ao longo da safra, que constitui uma restrição principal para rendimentos elevados, especialmente nas fases mais críticas das culturas (YAU et al., 2011).

O manejo de água em sistemas agrícolas exige um adequado uso de irrigações a fim de evitar impactos adversos sobre o rendimento e a qualidade dos grãos. Para auxiliar nas decisões sobre as diferentes estratégias de irrigação, várias abordagens de modelagem podem ser adotadas, como por exemplo, o modelo SIMDualKc, utilizado para simular o balanço de água no solo. Descrito por Rosa et al. (2012a), o SIMdualKc, adota a metodologia dos coeficientes duais para determinar o balanço hídrico diário, computando a evapotranspiração da cultura, a partir do particionamento da mesma em evaporação do solo (E_s) compreendida em duas fases (RICHIE, 1972; ALLEN et al., 1998) e transpiração da cultura (T_c), permitindo uma análise precisa de como a água da precipitação e da irrigação são utilizadas pela cultura.

Desse modo, sendo o trigo um alimento de extrema importância em escala mundial, se faz necessário o entendimento da dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera nas diferentes regiões que cultivam trigo, a fim de sanar as necessidades hídricas da cultura, para que o rendimento e produtividade da cultura não seja afetado. Nesta temática, direcionada ao cultivo de trigo no Brasil, buscou-se neste trabalho, avaliar o balanço hídrico na cultura do trigo em diferentes cenários climáticos, bem como avaliar a gestão da água de irrigação em nível de propriedade rural irrigada e seus efeitos na produtividade de trigo, para uma região seca e outra úmida.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o balanço hídrico durante o ciclo da cultura do trigo cultivado em dois cenários climáticos (temperado e tropical), visando identificar a ocorrência de stress hídrico no período em que o rendimento e qualidade dos grãos são afetados.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Calibrar e validar adequadamente o modelo de balanço hídrico SIMDualKc para estimar o particionamento da evapotranspiração (ET_c), na transpiração das plantas (T_c) e evaporação do solo (E_s) da cultura do trigo através de observações realizadas a campo.

Avaliar o consumo de água e rendimento de grãos da cultura do trigo em cenários de clima seco e úmido, incluindo a derivação dos coeficientes de cultura basal (K_{cb}), visando contribuir para uma adaptação de acordo com variabilidade climática de cada local.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 A CULTURA DO TRIGO

Cultivado em todo o mundo, o trigo (*Triticum spp.*) é consumido por bilhões de pessoas, sendo considerado em muitas dietas a principal fonte de alimento. De acordo com Dinu et al. (2018), o trigo é o cereal mais significativo na nutrição humana, atingindo o patamar do segundo cereal mais produzido no mundo, ficando apenas atrás do milho. Caracteriza-se como a cultura mais antiga que se conhece, sendo cultivada em mais de 120 países, onde se adotam diferentes formas de manejo, devido às diferentes condições geográficas e climáticas. Devido aos altos índices de produção, tornou-se a cultura mais cultivada em extensão e o cereal mais negociado em escala mundial atualmente (BIRD e REGINA, 2018). Com a adoção de melhores práticas agronômicas e introdução de novas variedades, nos últimos anos, o trigo aumentou significativamente a sua produção (PAULSEN et al., 2016).

Originário da Ásia, pertence à família Gramineae, a combinação de vários gêneros *Triticum* originou o trigo comum, o *Triticum aestivum*, que é a espécie cultivada. Normalmente, os trigos denominados como trigos de inverno e primavera são utilizados para a produção de alimentos. O cereal é utilizado como ingrediente principal em vários produtos como pães, massas, macarrão, biscoitos e bolos (KISZONA E MORRIS, 2017). Também pode ser utilizado na elaboração de produtos não alimentícios como misturas adesivas ou de laminação para papéis ou madeiras, colas, misturas para impressão, agentes surfactantes, embalagens solúveis ou comestíveis, álcool, antibióticos, vitaminas, fármacos e cosméticos. Além disso, o trigo é empregado na alimentação animal, na forma de forragem, de grão ou na composição de ração (DE MORI E IGNACZAK, 2011).

A União Europeia, Ásia e Estados Unidos são os maiores produtores de trigo, com destaque nos seguintes países: China, Índia, Rússia, Estados Unidos. Na safra de 2017/18, a área plantada no mundo foi de 219,48 milhões de ha, com uma produção de 757,92 milhões de toneladas e com uma produtividade 3.450 kg/ha⁻¹, em média. O Brasil cultivou uma área de 1,92 milhões de ha, com 2.230 kg/ha⁻¹ de produtividade e uma produção de 4,26 milhões de toneladas (USDA, 2018). Todavia, a produção brasileira atende apenas a metade ou a um terço das necessidades do país, sendo necessária a importação do produto, principalmente da Argentina, EUA, Uruguai, Paraguai e Canadá.

No Brasil, o trigo é cultivado em uma ampla gama de regiões, abrangendo zonas temperadas, tropicais e subtropicais, principalmente na safra de inverno, em rotação com milho ou soja, preconizando a sustentabilidade da agricultura nacional (EMBRAPA, 2017). No Rio Grande do Sul, o período ideal para semeadura é de maio a julho, de acordo com o zoneamento climático. No cerrado brasileiro recomenda-se realizar a semeadura da cultura entre 10 de abril a 30 de maio pois, quando a semeadura é realizada dentro desse intervalo de tempo, se atinge melhores resultados (CUNHA et al., 2001). A região Sul é a principal produtora do cereal, sendo o Rio Grande do Sul e Paraná os estados que mais produzem, com 87% da produção nacional (IBGE, 2017). Mesmo sendo uma cultura versátil em diferentes cenários climáticos, o trigo é altamente suscetível às oscilações relacionadas ao clima. No inverno, a ocorrência de chuvas no período vegetativo é benéfica para a cultura, entretanto, chuvas com alta frequência no período de enchimento de grãos e na maturação fisiológica, pode causar efeitos maléficos ao trigo e próximo ao período de colheita pode aumentar a umidade do grão, atrasando a venda do produto (ARYAL et al., 2016). Além disso, pode ocasionar moléstias, germinação do grão na espiga e acamamento das plantas.

Nos últimos anos, o mercado global aponta ascensão da produção agrícola nacional no cerrado brasileiro (Rada, 2013), surgindo como alternativa para elevar a produção de trigo no Brasil. Aumentos significativos nos índices de produção e produtividade da cultura do trigo em relação aos demais estados produtores, fazem com que o cerrado venha ocupando espaço importante no cenário nacional. Fatores climáticos, como dias quentes, noites frias, dias ensolarados, clima seco, investimentos em tecnologias e pesquisas foram elementos que incrementaram a produção da região, além disso, devido ao menor tempo de ciclo, a comercialização é favorecida e produtores obtêm melhor valor de venda do cereal.

A região do cerrado apresenta estacionalidade das chuvas, caracterizando duas estações bem definidas: uma chuvosa, entre outubro e abril, quando ocorre geralmente 90% da precipitação anual, e uma estação seca, no período de maio a setembro, sendo que a precipitação média anual é de 1500 mm (\pm 50 mm). A época das secas caracteriza-se com grande evaporação e baixa umidade relativa do ar (EMBRAPA, 2012). Durante a safra de trigo no cerrado, realizado entre o período de maio a outubro, os índices pluviométricos são baixos, que é característico da estação seca. Para que seja suprida a demanda da cultura faz-se necessário o uso da irrigação, como ferramenta essencial para a obtenção de bons rendimentos da cultura.

Devido à incerteza na quantidade e distribuição das chuvas ao longo da safra, a irrigação suplementar surge como alternativa, especialmente nos estádios de desenvolvimento

mais críticos das culturas (YAU et al., 2011). Além de fornecer água às plantas, a irrigação aumenta a produtividade das culturas (GIMÉNEZ et al., 2017). Do total da área cultivada no mundo, 20% usam a irrigação, sendo responsável por metade da produção mundial agrícola (FAOSTAT, 2017). No Brasil, 21% das áreas irrigadas são por meio de pivô central (~1.4 milhões de hectares), sendo que 75% dessa área encontra-se localizada no Sudeste e Centro-Oeste (RIBEIRO, 2018).

Na cultura do trigo, o requerimento hídrico durante o ciclo de cultivo varia entre 450 a 650 mm, sendo que esses valores oscilam de acordo com o clima e duração do ciclo (DOORENBOS E KASSAM,1979). Nos estádios fenológicos de formação de órgãos reprodutivos e floração, a demanda hídrica é maior. A fase de pré-antese é a mais sensível a deficiência hídrica, ocasionando a redução no número de grãos afetando a produtividade (SANTOS et al., 2012). Estima-se que 60 % das áreas cultivadas com trigo sofrem com o estresse hídrico moderado, principalmente em ambientes áridos e semiáridos (BAYGI et al., 2016).

Desse modo, a otimização da irrigação durante o ciclo da cultura, principalmente em estádios que requerem maior quantidade de água, pode aumentar o rendimento. Entretanto, o excesso hídrico durante os estágios finais de desenvolvimento do trigo de inverno pode causar redução no rendimento, principalmente perto da colheita (GRONT, 2018).

3.2 BALANÇO HÍDRICO DO SOLO

Os componentes do balanço hídrico são integrados por meio de entradas via precipitação pluvial e irrigação, e por saídas que ocorrem pela evapotranspiração, percolação profunda e escoamentos superficial e subsuperficial em certa porção do solo em determinado tempo (ALLEN et al., 1998). O cálculo do balanço hídrico pode ser determinado por meio de escala diária, semanal, mensal ou anual, conforme o objetivo da pesquisa e da disponibilidade de dados.

O balanço hídrico pode ser utilizado para diversos fins, como identificar os períodos secos (deficiência hídrica) e úmidos (excedente hídrico) de uma determinada região, que seja utilizada para a agricultura, identificar os melhores períodos para a colheita, irrigação, manejo do solo, entre outras práticas. Além disso, permite estimar o potencial hídrico de uma região favorecendo o gerenciamento integrado dos recursos hídricos (SANTOS et al.,2010).

A importância da utilização do balanço hídrico está em computar as saídas e entradas de água no solo, determinando os períodos mais prováveis ao déficit hídrico para a cultura.

Além disso, não só ao conhecimento dos fatores que o compõem (evapotranspiração, precipitação, drenagem interna ou ascensão capilar) mas, também, ao conhecimento das características da planta, principalmente da sua fenologia, que representa o ponto de partida para a interpretação coerente dos resultados do balanço hídrico (CINTRA et al., 2000). Contudo, determinar o balanço hídrico não é tão simples, pois requer o entendimento de uma gama de variáveis envolvidas, tornando-se uma atividade complexa.

Existem diversos métodos para determinar o balanço hídrico, cada qual sendo utilizado de acordo com a finalidade da pesquisa. Portanto, obter o entendimento de como as plantas utilizam a água no solo, e de como respondem aos níveis de armazenagem de água a partir do balanço hídrico, pode ser uma alternativa possível para estratégias de manejo, como gestão de sistemas de irrigação, visando ao melhor uso do acúmulo de água no solo pelas as culturas (SILVA et al., 2011).

Dentro desse contexto, a evapotranspiração de referência (ET_0) é um importante componente do ciclo hidrológico e energético (HOEDJES et al., 2008), tendo grande impacto nas plantas. É considerada uma das principais variáveis envolvidas no entendimento do sistema solo-planta-atmosfera e podendo atingir até 95% do balanço hídrico em áreas secas. Seu conceito foi introduzido para representar a demanda atmosférica de água, independentemente da cultura, de modo que disponibilidade de água não seja um fator limitante (ALLEN et al., 1998).

A (ET_c) é o agrupamento de dois fatores distintos, em que a perda de água ocorre por meio da superfície do solo denominada como evaporação do solo (E_s), e pela transpiração através dos estômatos das plantas (T_c), ambos os processos acontecendo simultaneamente (ALLEN et al., 1998). O particionamento da evapotranspiração da cultura (ET_c) na evaporação do solo (E_s) e a transpiração das plantas (T_c) é complexo, e por meio destes dois fatores pode-se relacionar a produção de biomassa à transpiração, e também parametrizar com exatidão a transpiração e evaporação em modelos de crescimento de culturas e hidrológicos (YIMAM, 2015).

Geralmente, T_c está associada com aumentos de produtividade da planta, enquanto E_s não está diretamente relacionada à produção, considerado por muitos como uma fonte de perda de água ou ineficiência (KOOL et al., 2014). O particionamento de evapotranspiração pode ser estimado diretamente através de medições de isótopos ou a abordagem de particionamento ET baseada em correlação, ou a partir de vários modelos e modificações dos modelos com base em uma abordagem combinada para calcular simultaneamente E_s e T_c (KOOL et al., 2014).

Na literatura, existem diversos modelos e variações de modelos que abordam o particionamento da evapotranspiração, classificados em abordagens mecânicas, empíricas ou numéricas e analíticas, como por exemplo, Shuttleworth-Wallace (1985), Enwatbal (LASCANO et al., 1987), Cupido-Dpevap (THOMPSON et al., 1993a), Sweat (DAAMEN E SIMMONDS, 1994), TSEB (NORMAN et al., 1995, ANDERSON et al., 1997, KUSTAS E NORMAN, 1999), FAO modelo K_c dual (ALLEN et al., 1998), Hydrus-1D (SIMUNEK et al., 2008).

3.3 MODELOS DE SIMULAÇÃO DE BALANÇO HÍDRICO NO SOLO

A água é um fator abiótico de extrema importância para as plantas, sendo o principal fator limitante relacionado ao rendimento das culturas. O conhecimento e a compreensão da dinâmica da água no solo permitem uma apropriada gestão da água, de modo a evitar um estresse hídrico, principalmente em períodos que expressam a produtividade da cultura e afetam sua qualidade (PEREIRA et al., 2015).

Atualmente, diversos modelos de balanço hídrico estão sendo muito abordados, devido a sua eficiência computacional e estabilidade em modelagem, principalmente em grande escala (MIAO et al., 2018). Esses modelos são instrumentos importantes para prever a resposta da cultura em diferentes cenários climáticos e gestão de irrigação (CAMPOS et al., 2016).

Modelos mecânicos são utilizados para simular biomassa, água e disponibilidade de nutrientes. Porém, esses modelos exigem um elevado número de dados relacionados à cultura, nutrientes e características hidráulicas do solo. Esses modelos podem ser uma ferramenta útil para auxílio nas tomadas de decisões em relação ao manejo de culturas, porém, na prática, há dificuldade em aplicá-los devido a sua maior complexibilidade (NASSIF, 2010). Entretanto, modelos de balanço hídrico do solo são direcionados a agendamento de irrigação necessitando menos dados de entrada para a realização da parametrização das culturas, abordando um procedimento mais simples para a estimativa da ET_c (ROSA et al., 2012a).

Existem diversos modelos de balanço hídrico do solo, como por exemplo o Budget (RAES et al., 2006) e SIMDualKc (ROSA et al., 2012a), que auxiliam nas decisões relacionadas ao agendamento ou programação de irrigação, modelos de crescimento e produção que estimam rendimentos em função da água, como são os modelos CropSyst (DONATELLI et al., 1997; BELHOUCLETTE et al., 2008), e AquaCrop (STEDUTO et al., 2009; ARAYA et al., 2010; ABRHA et al., 2012). A modelagem do balanço hídrico combinada com monitoramento a campo, permite um melhor entendimento das variáveis que

compõe o ciclo hidrológico, de modo que a partir desse conhecimento se possa desenvolver alternativas de manejo adequadas (SINGH et al., 2017).

3.3.1 O modelo SIMDualKc

Nos últimos anos, surgiram diversos modelos de simulação para a programação de irrigação, com a finalidade de auxiliar na gestão de irrigação, produtividade da água, entre outros. Esses modelos simulam a dinâmica da água no solo mediante o cálculo da evapotranspiração da cultura (ET_c), além de incluírem funções de rendimento-água (funções de água-produção) para estimar o decréscimo de rendimento associada ao déficit hídrico (ROSA et al., 2012a). Grande parte dos modelos de simulação da necessidade de irrigação adotam a metodologia do coeficiente de cultivo simples (K_c) ou da curva do K_c , o qual é composto pela interação da transpiração da cultura e evaporação do solo e um único coeficiente.

ALLEN et al. (2005) propuseram a adoção do coeficiente dual de cultura (K_c dual), devido a sua maior eficiência, principalmente em lugares onde se realiza irrigações e eventos de chuvas com maior frequência e, para culturas que tem cobertura parcial do solo, onde a maior parte da ET_c se deve a E_s . O uso permite determinar com melhor precisão a ET_c diária. O coeficiente dual no solo (K_c dual) é dividido em coeficiente de evaporação (K_e) e coeficiente da cultura basal (K_{cb}) (ROSA et al., 2012a).

ROSA et al. (2012a) criaram o modelo de balanço hídrico SIMDualKc, que utiliza a abordagem do K_c dual, para computar a evapotranspiração da cultura, a partir da computação das duas fases da E_s (RICHIE, 1972; ALLEN et al., 1998) e da transpiração da cultura (T_c), permitindo uma análise precisa de como a água da precipitação e da irrigação são utilizadas pelas culturas. O SIMDualKc permite o cálculo diário do balanço hídrico do solo, possibilitando que valores de evapotranspiração da cultura possam ser utilizados com modelos de água-produção (STEWART et al., 1977), adotando, assim, uma função linear de produtividade de água, que relaciona a perda de rendimento relativo (K_y) a algum déficit hídrico na cultura durante seu ciclo (PAREDES et al., 2015).

Diversos trabalhos nos últimos anos vem adotando o modelo SIMDualKc com as culturas do milho, trigo e algodão (ROSA et al., 2012b), com trigo, milho e girassol (MIAO et al., 2016), milho (MARTINS et al., 2013), trigo e milho (ZHAO et al., 2013), soja (WEI et al., 2015), cevada malteira (PEREIRA et al., 2015), batata (PAREDES et al., 2018), e azeitona (PAÇO et al., 2014). Nesses estudos, o modelo SIMDualKc obteve desempenho

satisfatório na determinação do balanço hídrico do solo em diferentes cenários climáticos e em diferentes períodos do ano.

Miao et al. (2016), em trabalho realizado no distrito de irrigação de Hetao, na China, avaliaram a modelagem do uso da água, a T_c e E_s em sistema consorciado de trigo de primavera com milho, e trigo de primavera com girassol, abordando o uso do coeficiente de cultivo dual. Os resultados encontrados demonstram que a aplicação do coeficiente dual de cultura levou a uma boa compreensão do uso de água de sistemas de consórcio comparativamente a culturas individuais. Além disso, os resultados de bom ajuste em relação às simulações de modelos mostraram uma grande precisão nas previsões realizadas pelo modelo.

Trabalho realizado por PEREIRA et al. (2015), usando os modelos Aquacrop e SIMDualKc em Portugal para os a cultura da cevada malteira, analisaram a modelagem do uso da água e o particionamento da evapotranspiração, em dois anos de chuva contrastantes: 2012 (ano seco) e 2013 (ano úmido). Usando o SIMDualKc, a partição de ET, cuja determinação do coeficiente de base potencial (K_{cb}) e real ou atual ($K_{cb\ act}$), além do coeficiente de evaporação (K_e) foi bem testado e validado para estudos de campo, com observação da T_c e E_s . Resultados mostram uma simulação precisa do conteúdo de água do solo, o que leva a supor que o termo balanço hídrico e uso da água foram bem simulados.

Avaliação da transpiração da batata, rendimento e produtividade da água sob vários regimes de água e datas de plantio usando a abordagem do K_c dual foi alvo de pesquisa por Paredes et al. (2018), no sul da Itália. Concluíram que o modelo e as metodologias utilizadas no trabalho foram adequadas para apoiar o gerenciamento da irrigação, orientando os agricultores locais para práticas de manejos. Paço et al. (2014) realizaram estudo com a cultura da oliveira para avaliar a ET_c e os K_c através de observações terrestres e por satélites, aplicando o modelo SIMDualKc. Os autores observaram que o procedimento de simulação do K_c em função da fração da cobertura e da altura da planta utilizada no SIMDualKc, mostrou-se adequado para a comparação entre a ET derivada do SIMDualKc e os dados do solo.

A planície do norte da China foi cenário de estudo para a realização da modelagem da T_c , E_s e previsão de produtividade da soja durante quatro anos de observações, por Wei et al. (2015), verificando que o modelo de balanço hídrico SIMDualKc foi validado e calibrado com sucesso para a cultura da soja, demonstrando resultados de boa qualidade. Zhao et al. (2013) trabalharam com as culturas do milho e trigo em trabalho feito em Pequim, realizando a modelagem do coeficiente cultura dual aplicado à uma sequência de milho e trigo, concluindo que o modelo SIMDualKc utiliza uma metodologia mais precisa e adequada para

apoiar a melhor produtividade e economia da água em Pequim. Os resultados obtidos demonstraram que o modelo é apropriado para apoiar o desenvolvimento de melhores cronogramas de irrigação para a sequência de culturas de milho de trigo e verão.

Portanto, após vários estudos concretizados, o modelo SIMDualKc demonstra ser uma ferramenta eficaz para a realização do balanço hídrico do solo, auxiliando na calendarização e agendamento de irrigação, de forma a utilizar o recurso hídrico água de forma eficiente e racional, tendo em vista que o mesmo se encontra cada vez mais escasso.

3.4 RENDIMENTO DA CULTURA

A capacidade de alimentar a população, que se encontra em constante crescimento no mundo, é o grande desafio do presente, para a agricultura mundial, que busca atender à demanda alimentar atual e futura. De acordo com Gazzoni (2017), será necessário elevar em 70% a produção de alimentos até 2050, para atender a dieta mínima diária da população mundial.

Soluções como a expansão da área de cultivo, maiores índices de rendimentos por unidade de área ou fusão dos dois fatores, são alternativas possíveis para que sejam atingidos os tetos de produção em questão, de modo que a segurança alimentar e sustentabilidade não sejam ameaçadas num futuro próximo (MERLOS, et al., 2015). O potencial rendimento de uma cultivar caracteriza-se como o rendimento da mesma, cultivada em um ambiente, ao qual esteja adaptada, de maneira que seu crescimento seja íntegro e a realização de práticas de manejo sejam apropriadas, limitações por deficiências nutricionais, estresse hídrico, assim como fatores fitossanitários (ervas daninhas, pragas e doença), devem ser evitados ou controlados (LOOMIS E CONNOR, 1992; RENE et., al 2018).

O potencial de rendimento e, portanto, a localização e ano específico, depende do genótipo da cultura, juntamente com fatores climáticos (radiação solar, temperatura do ar), além da disponibilidade de água. O rendimento é dependente do abastecimento de água conforme a precipitação e água disponível no solo, tipo de solo, e práticas de manejo durante a estação de crescimento da cultura, de modo que tais interações não limitem sua expressão (GRASSINI et al., 2011). Merlos et al. (2015) sustentam que o potencial de rendimento é atingido quando o mesmo obtenha 80% do teto produtivo. Tal objetivo pode se alcançar a partir do acréscimo do potencial produtivo ou através da redução das lacunas de rendimento, em práticas agrícolas que interferem em números relativos à produção. As lacunas de rendimento podem ser reduzidas por meio de maiores rendimentos por intermédio de ganhos

de eficiência, resultando aumento da taxa de crescimento de produção, implicações nos preços dos alimentos e a segurança alimentar (LOBELL et al., 2009, DZANKU et al., 2015).

A medição da estabilidade do rendimento das culturas é um fator importante para uma agricultura sustentável, pois a instabilidade prediz as variações de oscilações no rendimento das culturas, como também monitora alterações climáticas globais. Portanto, rendimento e estabilidade são componentes importantes na realização de estimativas dos rendimentos das culturas (CHEN et al., 2018). A estabilidade pode ser afetada por diversos fatores, acarreta redução de rendimento das culturas, dentre eles, as mudanças meteorológicas, como aumento das temperaturas, recorrentes nas últimas décadas. Temperaturas mais elevadas acabam reduzindo o ciclo de cultivo, ocorrência de alterações no estágio reprodutivo da cultura, de modo que o crescimento e o rendimento são afetados pelo aumento das temperaturas máximas, assim como as mínimas (GARCIA et al., 2018).

A ausência de água durante o ciclo da cultura, é outro fator que interfere diretamente no rendimento, de modo significativo. A ocorrência de déficit hídrico, causa redução significativa no rendimento de grãos, principalmente quando o estresse ocorre em estádios reprodutivos (GAVA et al., 2015). O rendimento é extremamente importante, quando relacionado a questões referente a segurança alimentar e a sustentabilidade mundial, seu monitoramento e acréscimo são essenciais.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DO ESTUDO

Para a realização deste estudo foram utilizados dois cenários com situações agroclimáticas distintas. Os dois cenários foram analisados durante o cultivo da cultura do trigo, nos anos agrícolas de 2017 e 2018. O primeiro (Cenário I) foi realizado em uma propriedade rural, localizada na região Centro-Oeste do Brasil, possuindo um clima quente e úmido com inverno seco. Esta propriedade encontra-se no município de Cristalina, leste do estado de Goiás, no entorno do Distrito Federal, denominada Fazenda Pamplona, pertencente ao Grupo SLC S/A.

O segundo cenário (Cenário II) é uma área cultivada na região Sul do Brasil, possuindo um clima subtropical úmido e com verões quentes, localizada na estação experimental do Sistema Irriga®, pertencente ao Departamento de Engenharia Rural, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no município de Santa Maria, região central do Rio Grande do Sul.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO NO CENÁRIO I

4.2.1 Descrição da área

A fazenda Pamplona, do Grupo SLC S/A está localizada no município de Cristalina-GO. O local situa-se entre coordenadas geográficas de 16°13'42,1" de Latitude S e 47°37'34,5" Longitude de W e 991 metros de altitude.

O clima da região é caracterizado como Aw (equatorial de savana, com estação seca no inverno), conforme a classificação de Köppen-Geiger (KOTTEK et al., 2006), com temperaturas médias anuais em torno de 23°C. As temperaturas máximas podem atingir até 39°C, ocorrendo no período da estação das chuvas, entre os meses de outubro e abril. Na estação da seca, que compreende o período de maio a setembro, observa-se temperaturas baixas, que podem chegar até 4°C, dependendo da região do estado. A precipitação pluviométrica média anual é de 1.500 mm (CARDOSO et al., 2014) e o solo do local é classificado como Latossolo vermelho amarelo.

4.2.2 Descrição do estudo

A área irrigada da propriedade é de 2.672 ha, em sistema pivô central, distribuídos num total de 26 equipamentos. No presente estudo foram utilizados os pivôs 12 e 13 (2017), e os pivôs 07 e 26 (2018). Para melhor entendimento e compreensão da leitura, o pivô 12 será denominado de área 1, pivô 13 de área 2, pivô 7 de área 3 e pivô 26 de área 4 (Figura 1).

Figura 1: Localização e foto aérea da sede da Fazenda Pamplona, Cristalina-GO, com destaque para áreas 1, 2, 3, 4



Fonte: Autores.

As características técnicas dos equipamentos de irrigação, área irrigada por equipamento, coordenadas geográficas e altitude são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1- Coordenadas geográficas, altitude média, lâmina mínima, tempo de rotação, área irrigadas dos equipamentos 1, 2, 3 e 4, nos anos de 2017 e 2018

Áreas	Área (ha)	Lâmina mínima (mm)	Tempo de rotação (h)	Coordenadas geográficas	Altitude (m)
1	119,9	4,50	12,27	16°15'06"S; 47°40'22,2"W	971
2	119,9	4,60	12,39	16°15'08"S; 47°41'03,6"W	977
3	107,4	4,00	12,10	16°13'30"S; 47°35'28,2"W	981
4	108,2	4,70	13,10	16°12'10"S; 47°37'30"W	1004

Fonte: Autores.

4.2.3 Obtenção de dados meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizados no estudo do cenário I foram obtidos de uma estação meteorológica automática, Marca Davis, modelo VantagePro Connect (Davis Instruments, CA, USA) localizada na própria fazenda. A evapotranspiração de referência (ET_0) diária foi estimada pelo método proposto pela FAO, a partir da equação de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) utilizando dados de temperatura mínima e máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa mínima e máxima do ar (%), velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}) e radiação solar ($\text{MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$).

4.2.4 Características físicas e hidráulicas do solo

Em cada área estudada foram coletadas amostras estratificadas nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-80 cm, tanto indeformadas, em anéis volumétricos, quanto deformadas. Estas foram embaladas em sacos plásticos, e os anéis foram envolvidos em filmes plásticos, ambas acondicionadas em embalagens de isopor e enviadas ao laboratório de física do solo do Sistema Irriga[®] da UFSM para serem submetidas às análises físico-hídricas. A curva de retenção de água no solo (CRA) foi determinada em laboratório, onde as amostras foram inicialmente saturadas e submetidas às tensões matriciais de 0,1, 0,6, e 10 (em mesa de areia), 33 e 100 kPa no aparelho extrator de Richards (EMBRAPA, 1997). Após atingir o equilíbrio em cada tensão, as amostras foram pesadas, retornando à mesa e extrator para o processamento da tensão. Após a tensão de 100 kPa, as amostras foram levadas a secar em estufa a 105°C , até atingir massa constante.

O conteúdo de água no ponto de murcha permanente (conteúdo de água correspondente ao potencial de -1.500 kPa) foi determinado por psicometria, utilizando o psicômetro de termopar, modelo WP4-T (DECAGON DEVICES, Inc, LOGAN, Utah, USA), com amostras de estruturas indeformadas. A textura e densidade do solo (D_s) foram determinadas de acordo com a metodologia proposta pela Embrapa (1997), enquanto a densidade de partículas (D_p) foi determinado pelo método do balão volumétrico, modificado por Gubiani et al. (2006). As propriedades físico-hídricas do solo das áreas irrigadas no cenário I são representadas na tabela 2.

Tabela 2- Propriedades físico-hídricas das áreas irrigadas 1, 2, 3, 4, no Cenário I

Profundidade do solo (cm)	Textura do solo (%)			Densidade do solo (g cm^{-3})		Conteúdo de água ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)		TAW (mm)
	Areia	Silte	Argila	Ds	Dp	θ_{FC}	θ_{WP}	
Área 1								
00-20	7	40	53	1,10	2,51	0,46	0,29	102
20-40	5	36	59	0,96	2,54	0,34	0,24	
40-80	3	34	63	0,97	2,60	0,36	0,25	
Área 2								
00-20	8	37	57	1,10	2,52	0,42	0,27	106
20-40	5	39	56	1,03	2,58	0,37	0,25	
40-80	5	34	62	0,98	2,58	0,37	0,24	
Área 3								
00-20	4	41	53	1,18	2,45	0,44	0,28	104
20-40	4	38	58	1,15	2,56	0,41	0,27	
40-80	3	37	61	1,00	2,51	0,35	0,24	
Área 4								
00-20	5	42	53	1,04	2,43	0,43	0,27	106
20-40	2	40	58	1,09	2,48	0,40	0,27	
40-80	2	38	60	1,04	2,50	0,37	0,25	

θ_{FC} : Capacidade de campo; θ_{PMP} : Ponto de murcha permanente; TAW = total de água disponível no solo, Ds: densidade do solo Dp: densidade de partículas.

Fonte: Autores.

4.2.5 Conteúdo de água no solo e manejo de irrigação

O conteúdo volumétrico de água no solo foi monitorado utilizando estações de campo do Sistema Irriga®, onde foram utilizados sensores do tipo de matriz granular (Watermark), instalados a 0-10 e 10-30 cm de profundidade, sendo realizadas leituras automáticas diárias do potencial de água no solo. A estação de campo era constituída de dois sensores de medição do potencial de água no solo, um pluviômetro de balança, um módulo de leitura e armazenamento de dados, uma placa solar, conectada a uma bateria de 12 volts, de forma a assegurar energia para os períodos em que a energia solar está ausente. Os dados são enviados automaticamente para o banco de dados do Sistema Irriga, em escala diária, através de um chip GPRS (General Packet Radio Services), acoplado ao módulo de leitura e armazenamento.

Os dados observados de umidade de água no solo, medidos em potencial (kPa), foram transformados em conteúdo volumétrico de água (θ) no solo, utilizando o modelo Van Genuchten (1980), conforme a equação 1. Após a conversão do potencial em θ , fez-se a média ponderada da lâmina de água armazenada em cada camada do solo. Os parâmetros empíricos α , n e m foram gerados a partir da curva de retenção de água determinada em laboratório.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (1)$$

Em que θ_r é a umidade residual, θ_s umidade na saturação, α , m e n são os parâmetros independentes estimados a partir dos dados observados de retenção de água no solo e h são os dados observados do potencial de água no solo. Para este estudo, considerou-se como θ_r a umidade da terra fina seca ao ar (TFSA), usada na determinação da textura e D_p .

4.2.6 Implantação e manejo da cultura

As variedades de trigo utilizadas foram as cultivares BRS 264 e BRS 394, em espaçamento nas entrelinhas de 0,17 m, com uma população de plantas de 400 plantas/m². A primeira é caracterizada como cultivar super precoce, com ciclo médio de 115 dias, ocupando cerca de 80% da área cultivada no cerrado, enquanto que, a segunda, foi lançada no mercado recentemente, possuindo um alto potencial produtivo, ampla adaptação às condições locais e tem um ciclo médio de 115-120 dias. O manejo da cultura do trigo foi realizado pelo produtor, de acordo com as recomendações feitas pelos técnicos, a fim de evitar qualquer estresse abiótico durante o ciclo de cultivo.

4.2.7 Determinações fenológicas e morfológicas

Os estádios fenológicos e de desenvolvimento das plantas foram identificados e monitorados ao longo de desenvolvimento da cultura pelos técnicos do Sistema Irriga®, em intervalos de tempo de aproximadamente 15 dias.

A fração de cobertura (f_c) foi determinada através das imagens obtidas do satélite Sentinel 2, que realiza coleta de dados de vegetação, com uma revisita a cada 5 dias. Após captura de imagens, utilizou-se a ferramenta Google Earth Engine, realizando o processamento de imagens da cultura obtidas pelo satélite. A fração cobertura (f_c) da cultura ao longo do ciclo, foi calculada a partir dos dados de Índice de Vegetação (VI), derivados dos dados de reflectância obtidos por sensoriamento remoto. Posteriormente, foi calculado o NDVI (índice de vegetação normalizado), gerando uma média de fração de cobertura para cada data, conforme a equação 2.

$$f_{cVI} = \beta_1 \left(\frac{VI_i - VI_{\min}}{VI_{\max} - VI_{\min}} \right) + \beta_2 \quad (2)$$

Em que, β_1 é um coeficiente empírico, que varia de 0 a 1, do máximo valor do VI para cada estágio da cultura. VI_i é o valor médio do VI por pixel para cada data, VI_{\max} e VI_{\min} correspondem ao VI para a cobertura máxima e mínima, respectivamente, e β_2 é um coeficiente de ajuste associado a senescência da cultura e folhas amarelando, compensando a diminuição do VI devido a senescência e/ou amarelecimento de plantas, independentemente de fração de cobertura.

4.2.8 Determinação do rendimento de grãos da cultura do trigo

A colheita foi realizada após a maturação fisiológica das plantas, sendo colhida 4 linhas, totalizando 0,68 m² em cada área, no ano de 2018. No ano de 2017, utilizou-se os dados de rendimento fornecidos pelo produtor, após colheita mecanizada. O rendimento de grãos da cultura (Kg/ha⁻¹) foi ajustado para a umidade de 13%. Os componentes de rendimento avaliados foram: n° de grãos/espiguetas, n° de espiguetas/espiga, n° de espigas/m², obtidas através da contagem de 10 plantas para cada área. O peso de 1000 grãos foi determinado a partir da contagem de oito repetições de 100 grãos.

4.2.9 Índice de colheita (IC)

Para determinação do índice de colheita (IC), as amostras obtidas numa área colhida de 0,68 m², em parcelas delimitadas próximo à localização da estação de campo, em cada área, foram acondicionadas em estufa de ventilação forçada a 65°C por 72 horas, para a determinação da biomassa seca. Após secagem, as amostras pesadas em balança de precisão, obtendo-se o IC através da relação entre a massa seca dos grãos e a massa seca da parte área da planta (somatório da massa seca das folhas, colmos, espiguetas e grãos).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO NO CENÁRIO II

4.3.1 Descrição da área

O estudo realizado no cenário II foi oriundo de dados obtidos de um experimento conduzido com a cultura do trigo no ano agrícola de 2018. O experimento foi realizado na área experimental do Sistema Irriga, pertencente ao Departamento de Engenharia Rural, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no município de Santa Maria, Rio Grande do Sul. A localização da área é latitude de 29°41'24'', longitude 53°48'42'' a uma altitude de 100 m. O clima do local é classificado como "Cfa" subtropical úmido, sem estação seca definida, com verões quentes (KOTTEK et al., 2006). O solo é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico arênico (EMBRAPA, 2006).

O tratamento utilizado era composto trigo irrigado e não irrigado. Neste estudo, a população de plantas utilizada foi de população de 425 plantas/m². O delineamento utilizado foi o de blocos ao acaso (DBA), composto por blocos que incluíam todos os tratamentos. O experimento era composto por três blocos, onde cada unidade experimental era composta por uma área útil de 21,6 m² (2,7 X 8). O período de execução do experimento foi de 13 de julho a 21 de novembro. O solo era coberto por palha de feijão, cultivado durante o verão de 2018.

4.3.2 Obtenção de dados meteorológicos

Os dados meteorológicos durante o período experimental foram obtidos de uma estação meteorológica automática, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada a 200 m da área experimental do Sistema Irriga. A evapotranspiração de referência (ET_o) diária foi estimada pelo método padrão Penman-Monteith, método parametrizado como padrão pelo Boletim FAO-56 (ALLEN et al., 1998).

4.3.3 Determinações das características físicas e hidráulicas do solo

As características físicas e hidráulicas do solo a área experimental foram determinadas no laboratório de solos do Sistema Irriga[®], e estão apresentadas na tabela 3. Realizou-se a análise granulométrica, utilizando o método da pipeta (TEIXEIRA et al., 2017). A determinação da densidade do solo (Ds) foi realizada pelo método do anel volumétrico, para amostras coletadas em uma área imediatamente ao lado das parcelas experimentais, nas

profundidades de 0-20, 20-40 e 40-70 cm. A densidade de partícula (D_p) foi determinada mediante o método do balão volumétrico modificado (GUBIANI et al., 2006).

A curva de retenção de água no solo (CRA) foi determinada em laboratório, onde, num primeiro momento, as amostras foram saturadas e submetidas às seguintes tensões matriciais de 0,1, 0,6, e 10 (em mesa de areia) e 33 e 100 kPa no aparelho extrator de Richards (EMBRAPA, 1997). Para a determinação do ponto de murcha permanente (conteúdo de água correspondente ao potencial de -1.500 kPa) utilizou-se o psicrômetro de termopar, modelo WP4-T (Decagon Devices, Inc.).

Tabela 3 - Propriedades físico-hídricas da área experimental do Sistema Irriga®-DER/UFSM, Santa Maria – RS, 2018

Profundidade do solo(cm)	Textura do solo (%)			Densidade do solo (g cm^{-3})		Conteúdo de água ($\text{cm}^{-3} \text{ cm}^{-3}$)		TAW mm
	Areia	Silte	Argila	D_s	D_p	θ_{FC}	θ_{WP}	
0-20	37	41	21	1,39	2,54	0,39	0,14	137
20-40	35	38	28	1,36	2,56	0,40	0,15	
40-70	33	28	38	1,35	2,61	0,39	0,17	

θ_{FC} : Capacidade de campo; θ_{PMP} : Ponto de murcha permanente; TAW = total de água disponível no solo, D_s : densidade do solo D_p : densidade de partículas.

Fonte: Autores.

Entretanto, para a determinação da capacidade de campo (θ_{CC}) foi utilizado o método de campo, realizando-se uma irrigação por 12 horas ininterruptas, saturando completamente o perfil do solo na área experimental; considerou-se como a θ_{CC} o valor do conteúdo volumétrico de água medido pelos sensores, em cada camada, 24 horas após o início da drenagem natural do solo.

4.3.4 Conteúdo de água no solo

O monitoramento do conteúdo de água no solo foi realizado durante todo o período de desenvolvimento da cultura, mediante a utilização de sensores FDR (Frequency Domain Reflectometer), modelo CS616, os quais forneciam dados de umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{ cm}^3$), para um datalogger CR1000 (Campbell Scientific Inc). Leituras de umidade do solo foram feitas pontualmente, em intervalos de três dias, aproximadamente, conectando o datalogger a um conjunto de sensores, coletando ao menos três leituras por sensor. Todas as unidades experimentais tinham sensores na camada de 0-30 cm, e em cada bloco tinha dois sensores na camada de 30-60 cm. A profundidade do sistema radicular foi de 0,80m.

4.3.5 Implantação e manejo da cultura

A cultivar de trigo utilizada foi a cultivar TBio Sinuelo, classificada como trigo pão, de ciclo médio/tardio. A semeadura foi feita em 13 de julho de 2018, de forma mecanizada, com espaçamento nas entrelinhas de 0,20 m. A colheita foi realizada no dia 21 de novembro de 2018, quando as plantas haviam atingido plena maturação fisiológica, ajustando-se o peso dos grãos para 13% de umidade.

O manejo fitossanitário para cultura do trigo foi realizado de forma preventiva para o controle de pragas e doenças durante todo o período de desenvolvimento da cultura. Foram feitas aplicações sanitárias nos dias 31/07/18, 19/09/18 e 10/10/18 com Hussar, Engeo Pleno, Piori Xtra, Ellatus e Nimbus. No dia da semeadura da cultura foi utilizado 450 Kg de NPK. Realizou-se também duas aplicações de nitrogênio, nos dias 07/08/18 onde foram aplicados 180 Kg/ha, e 08/09/18, 240 Kg/há, na forma de ureia. Não foi necessária a realização de irrigação no experimento devido às frequentes precipitações ocorridas durante o ciclo

4.3.6 Determinações fenológicas e morfológicas

Para a determinação dos estádios fenológicos da cultura, foram realizadas observações a campo semanalmente, de acordo com a escala de LARGE E FEEKS (1954).

As determinações morfológicas das plantas avaliadas foram área foliar e altura de plantas. Aos 12 dias após emergência (DAE) foram selecionadas duas plantas uniformes, localizadas nas linhas centrais de cada unidade experimental para serem realizadas as avaliações. As determinações morfológicas eram realizadas em intervalos de 10 dias durante o ciclo de desenvolvimento da cultura.

A determinação de altura de plantas foi feita medindo-se a distância vertical entre o colo da planta e a bainha da última folha expandida. A área foliar foi determinada de forma direta e não destrutiva, obtida a partir do produto das medidas de comprimento(C) e da largura máxima (L), multiplicando o valor obtido por um fator de correção de 0,75, conforme metodologia LARGE E FEEKS (1954).

4.3.7 Determinação do índice de cobertura vegetal

Para o cálculo da porcentagem da fração de cobertura do solo pelo dossel, utilizou-se o software Image J pelo método de fotografia. As imagens fotográficas foram realizadas

semanalmente, em 3 linhas centrais de cada parcela. Estas foram realizadas até o momento em que a cultura atingiu o fechamento total das entrelinhas, ou seja, a cobertura de 100% da superfície do solo.

4.3.8 Rendimento de grãos da cultura do trigo

A colheita foi realizada no dia 21/11/2018 após a maturação fisiológica das plantas, sendo colhida 3 linhas centrais, totalizando 0,60 m² em cada parcela. O rendimento de grãos da cultura (Kg/ha⁻¹) foi ajustado para a umidade de 13%. Os componentes de rendimento: n° de grãos/espiguetas, n° de espiguetas/espiga, n° de espigas/m², foram obtidos através da contagem de 10 plantas e peso de 1000 grãos foram determinados a partir da contagem de oito repetições de 100 grãos.

4.3.9 Determinação dos coeficientes de cultura basal (K_{cb})

A determinação dos coeficientes de cultura, no presente estudo foi realizada a partir de duas metodologias. Primeiramente os coeficientes de cultura basal foram obtidos através da metodologia de tentativa e erro (T e E), a fim de minimizar os erros residuais entre valores observados e simulados do conteúdo de água no solo utilizando o modelo de balanço hídrico SIMDualKc. A outra metodologia baseia-se na obtenção dos K_{cb} derivados dos índices de vegetação por reflectância. Essa metodologia adota o uso do coeficiente duplo de cultura (k_c), composto pelo K_{cb} e K_e , e em períodos de estresse hídrico a utilização do K_s , assim como o modelo SIMDualKc.

Os índices de vegetação usados para estimar os coeficientes de cultura basal foram obtidos pelo Sentinel 2 e imagens de satélite do Google Earth Engine. Na tabela 4 são apresentadas as datas de imagens de satélite em dias sem nuvens utilizadas para a estimativa da fração de cobertura e índices de vegetação (VI) no Cenário I.

Calculou-se um valor de VI médio para cada área de estudo. As imagens geradas foram corrigidas geometricamente para delimitar cada área de estudo. Esse procedimento de geometrização das áreas de faz necessário para desconsiderar valores de NDVI combinados com estradas ou outras culturas, que pudessem afetar a representatividade de cada pixel. O VI computado para o estudo foi o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Os dados do SIMDualKc foram usados como referência, ou seja, um padrão contra o qual comparações podem ser feitas, principalmente para a comparação dos resultados de K_{cb} s. O

modelo SIMDualKc foi previamente calibrado usando os dados do conteúdo de água no solo medido em cada área.

A metodologia do uso de índices de vegetação para estimativa do K_{cb} baseia-se na abordagem do coeficiente de cultura dual, como mencionando anteriormente, integrando assim

Tabela 4 – Datas das imagens utilizadas, em dias livres de cobertura de nuvens, durante o ciclo de desenvolvimento do trigo, no Cenário I

Área 1	Área 2	Área 3	Área 4
24/06/2017	24/06/2017	15/05/2018	30/05/2018
29/06/2017	29/06/2017	25/05/2018	04/06/2018
04/07/2017	09/07/2017	04/06/2018	09/06/2018
14/07/2017	14/07/2017	09/06/2018	14/06/2018
19/07/2017	19/07/2017	14/06/2018	19/06/2018
24/07/2017	24/07/2017	19/06/2018	24/06/2018
29/07/2017	29/07/2017	24/06/2018	29/06/2018
03/08/2017	03/08/2017	29/06/2018	04/07/2018
13/08/2017	13/08/2017	04/07/2018	09/07/2018
18/08/2017	18/08/2017	09/07/2018	19/07/2018
02/09/2017	02/09/2017	14/07/2018	24/07/2018
07/09/2017	07/09/2017	19/07/2018	29/07/2018
12/09/2017	12/09/2017	24/07/2018	03/08/2018
17/09/2017	17/09/2017	29/07/2018	08/08/2018
07/10/2017	07/10/2017	03/08/2018	13/08/2018
		08/08/2018	23/08/2018
		13/08/2018	28/08/2018
		23/08/2018	02/09/2018
		28/08/2018	07/09/2018
			12/09/2018
			17/09/2018

Fonte: Autores.

o K_{cb} e K_e , e considerando K_s quando ocorre estresse hídrico (ALLEN E PEREIRA, 2009). A equação foi desenvolvida para estimar o K_{cb} a partir do coeficiente de densidade (K_d) e $K_{c\ min}$ proposto por Allen e Pereira (2009) e de índices de vegetação derivados de imagens de satélite, $K_{cb\ VI}$:

$$K_{cb\ VI} = K_{c\ min} + K_d \left(\frac{VI_i - VI_{min}}{VI_{max} - VI_{min}} \right) \quad (3)$$

onde VI_i corresponde ao VI para uma data e pixel específicos, VI_{max} é o VI para vegetação com cobertura máxima, e VI_{min} é VI para cobertura vegetal mínima (solo nu). Esta equação se adapta a culturas com cobertura contínua do solo e para culturas de árvores com solo nu,

incluindo o K_d . O K_d foi obtido a partir da equação 4, usando o método da fração efetiva fração de solo coberto pela vegetação, estimada a partir da equação 2. Os valores de $NDVI_{max}$ e $NDVI_{min}$ que encontram-se na equação 2 foram estabelecidos de acordo com CALERA (2006) e DUCHEMIN (2006).

O $K_{cb\ VI}$ permite que as características da planta sejam ajustadas com base em dados de sensoriamento remoto, para assim, de acordo com a distribuição espacial da cultura, determinar a água que está sendo perdida pelo processo de transpiração da planta.

O coeficiente de densidade foi determinado a partir da equação 4, necessitando, para o cálculo, de dois dados observados em campo: fração de cobertura efetiva ($f_{c\ eff}$) e altura da planta (h):

$$K_d = \min \left(1, M_L, f_{ceff}, f_{ceff}^{\left(\frac{1}{1+h}\right)} \right) \quad (4)$$

onde $f_{c\ eff}$ é a fração efetiva do solo coberto ou sombreada por vegetação perto do meio-dia solar, M_L é um multiplicador em $f_{c\ eff}$ descrevendo o efeito da densidade do dossel no sombreamento e na ET máxima relativa por fração de solo sombreado (para simular os limites físicos impostos sobre o fluxo de água através do sistemas de raízes, caule e folha de plantas), e h é a altura média da vegetação (m). Portanto, o uso de K_d permite incorporar o impacto da densidade e da altura da vegetação na estimativa de K_{cb} . Quando o déficit hídrico do solo ocorre, o coeficiente de estresse K_s , é calculado pelo modelo usando um equilíbrio hídrico do solo para toda a zona radicular. A fração de cobertura do solo pode ser derivada a partir do índice de vegetação, conforme equação 2.

A tabela 5 apresenta os parâmetros que foram considerados para cada área na aplicação da equação 2, levando em consideração as variações dos índices de vegetação quanto ao amarelamento das folhas e valores máximos e mínimos de $NDVI$.

Os coeficientes de culturas basais determinados por $NDVI$ foram referentes apenas ao estudo realizado no cerrado brasileiro. Para o Cenário II, em função de ser uma área experimental, com parcelas pequenas, essa metodologia não pode ser aplicada.

Tabela 5- Parâmetros utilizados para fração de cobertura do solo com índice de vegetação.

	Estádio de desenvolvimento	Valor
NDVI máx		0,85
NDVI min		0,1
β_2		0-0,6
β_1	Inicial	0,3
	Desenvolvimento	0,6-0,9
	Intermediário	1
	Final	1

Fonte: Autores.

4.4 SIMULAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO DO SOLO (MODELO SIMDualKc)

Descrito por (Rosa et al., 2012^{a,b}), o modelo SimdualKc é utilizado para simular o balanço hídrico do solo, através da metodologia dos coeficientes duais de cultivo. O modelo adota a partição do coeficiente de cultivo ($K_{c\text{ dual}}=K_{cb} +K_e$) em coeficiente de cultura basal (K_{cb}) é relacionado com a transpiração da cultura e o coeficiente de evaporação (K_e) para a estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c). Para que seja realizada a simulação do balanço hídrico do solo pelo modelo são necessários os seguintes dados de entrada:

- (i) Dados de solo: o conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{FC}) e no ponto de murcha permanente (θ_{WP}), que permite calcular o total de água disponível (TAW, mm) que caracteriza-se como a disponibilidade de água entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente na profundidade radicular explorada pelas plantas (Tabelas 2 e 3), água prontamente disponível (RAW, mm), que representa o limite de disponibilidade de água às plantas para que não haja estresse hídrico, assim como os valores iniciais do total de água evaporável (TEW, mm) e água prontamente evaporável (REW, mm), que são determinados partir de dados de características texturais do solo na camada evaporável da superfície do solo (ALLEN et al., 1998) e espessura da camada de solo com água evaporável (Z_e).
- (ii) Dados meteorológicos: Dados referentes a precipitação (mm), umidade relativa mínima (RHmin, %), velocidade do vento (U_2 , m/s²), temperatura média diária (°C) e ET_o (mm dia⁻¹).

- (iii) Dados de irrigação: são necessários os dados das datas de realização das irrigações, lâminas líquidas irrigadas (mm), o sistema de irrigação utilizado e a fração de solo olhada pela irrigação (f_w). As datas e respectivas lâminas aplicadas são apresentadas na tabela 7.
- (iv) Dados da cultura: para a simulação, o modelo requer dados específicos da cultura, como altura de plantas, fração de cobertura do solo pelo dossel (f_c) e data dos principais estádios de desenvolvimento das plantas (inicial, crescimento rápido, intermediário e final), cujos dados são apresentados nas tabelas 4, 5 e 6, além da profundidade do sistema radicular, que nesse estudo foi de 0,80 m.

Tabela 6 - Datas das irrigações e lâminas brutas aplicadas (mm) durante o ciclo da cultura do trigo nos anos agrícolas de 2017 e 2018.

Ano Agrícola 2017				Ano Agrícola 2018			
Área 1		Área 2		Área 3		Área 4	
Data	(mm)	Data	(mm)	Data	(mm)	Data	(mm)
29/06	7,4	25/06	6,9	11/05	6	27/05	7,05
02/07	7,2	30/06	6,9	13/05	6	30/05	7,05
04/07	7	04/07	6,9	16/05	6	02/06	7,05
06/07	5	05/07	6,9	19/05	6	05/06	7,05
07/07	5,8	07/07	6,9	22/05	6	09/06	7,05
10/07	8,2	10/07	6,9	25/05	6	13/06	7,05
12/07	4,6	15/07	8,1	28/05	6	17/06	11,6
14/07	5,6	18/07	8,25	31/05	9,17	21/06	11,6
15/07	5,6	20/07	8,25	04/06	7,6	23/06	11,6
18/07	7,6	21/07	8,25	08/04	7,56	29/06	11,6
21/07	7	29/07	9,64	12/06	10	03/07	9,8
24/07	6,2	14/08	8,75	16/06	10	06/07	13,4
27/07	8,6	15/08	10	20/06	10	09/07	8,35
31/07	5	18/08	13,5	24/06	10	11/07	14,2
04/08	4	24/08	15	28/06	10	13/07	15,66
05/08	5	29/08	12	02/07	10	17/07	15,66
09/08	7	31/08	12,75	04/07	13	20/07	3,4
10/08	7	03/09	11	07/07	13	21/07	12,8
12/08	9	09/09	12	11/07	9,17	25/07	8,35
14/08	8	12/09	12,25	12/07	9,17	27/07	14
16/08	7	14/09	15,5	15/07	13	29/07	18
22/08	15	16/09	14	18/07	9,17	03/08	8,35
23/08	10,4	20/09	20	20/07	9,17	06/08	15,66
24/08	6,4	22/09	18,75	24/07	18	10/08	15,66
29/08	10,2	27/09	6,25	28/07	18	14/08	10,44
30/08	11,2	28/09	15	01/08	18	16/08	13,4
02/09	6,4	06/10	6	04/08	18	19/08	10,44
06/09	12,4			09/08	13,33	22/08	10,44
08/09	11,2			10/08	13,5	25/08	10,44
10/09	10,6			14/08	9	28/08	10,44
14/09	9,4			15/08	12	31/08	10,44
16/09	14,2			17/08	15,75	04/09	10,44
17/09	9,4			20/08	12	07/09	10,44
20/09	12,4			23/08	14	10/09	10,44
22/09	10			27/08	9	13/09	10,44
24/09	15						
Total	302		286,64		365		379,79

Tabela 7- Datas dos estádios de desenvolvimento da cultura nos anos de 2017 e 2018.

Datas de ocorrência dos principais estádios de desenvolvimento				
Área	Inicial	Crescimento rápido	Período intermediário	Início da senescência
Ano Agrícola 2017				
1	22/06-04/07	04/07-24/08	24/08-10/09	10/09-11/10
2	22/06-15/07	15/07-02/09	02/09-27/09	27/09-11/10
Ano Agrícola 2018				
3	09/05-01/06	01/06-29/06	29/06-12/08	12/08-30/09
4	25/05-04/06	04/06-08/07	08/07-20/08	20/08-19/09
C.II	13/07-10/08	10/08-19/09	19/09-19/10	19/10-21/11

*1, 2, 3, 4 são referentes as áreas, no cenário1, C.II (cenário II), locais de realização do estudo.

Fonte: Autores.

A fase inicial foi considerada desde a semeadura até o momento que o dossel cobria aproximadamente 10% do solo. A fase de crescimento rápido ocorre a partir do fim do período inicial até cobertura plena, isto corresponde à quando a cultura atinge um índice área foliar (IAF) igual a 3 (ALLEN et al.,1998). O período intermediário ocorre entre a cobertura plena até início da maturação e, nesse período que o K_c é máximo. O período final é compreendido entre a maturação fisiológica até a colheita.

A determinação dos coeficientes de cultura basal (K_{cb}) foi feita pelo procedimento de tentativa e erro, a partir dos valores padronizados por Allen et al. (1998), e ajustados levando em consideração os estádios fenológicos da cultura, clima, densidade e altura de plantas para os determinados locais de estudo.

Além dos parâmetros de solo, climáticos, da cultura e irrigações observados a campo, são necessários dados não observados para que seja realizada a simulação. Os dados não observados ou valores padrão, são as aproximações do K_{cb} , fração de depleção (p) para que não ocorra estresse, parâmetros de evaporação como: TEW, REW e Ze, e parâmetros para que seja estimada a percolação profunda (a_D e b_D). O SIMDualKc utiliza uma equação exponencial de declínio no tempo, como descrito por Liu et al. (2006), cujos valores de a_D e b_D para Santa Maria foram calibrados e validados Paredes et al. (2018). Os valores de K_{cb} e p para que fossem realizadas as simulações estão representados na tabela 9, referente aos dois cenários de estudo.

Tabela 8- Altura de plantas (h) e fração de cobertura do solo pelo dossel (fc) durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do trigo.

Ciclo de desenvolvimento das plantas						
Áreas	Altura de plantas		Inicial	Desenvolvimento	Intermediário	Final
	Fração de cobertura					
Ano Agrícola 2017						
1	h (m)		0,01	0,45	0,70	0,70
	fc		0,06	0,93	0,97	0,98
2	h (m)		0,01	0,45	0,8	0,8
	fc		0,10	0,91	0,95	0,91
Ano Agrícola 2018						
3	h (m)		0,27	0,4	0,80	0,8
	fc		0,15	0,84	0,88	0,60
4	h (m)		0,20	0,35	0,80	0,80
	fc		0,10	0,84	0,79	0,41
Cenário II	h (m)		0,20	0,32	0,60	0,60
	fc		0,03	0,66	0,76	0,60

* 1, 2, 3, 4 e cenário II são referentes aos pivôs, e experimento onde foi realizado o estudo com a cultura do trigo.

Fonte: Autores.

Com o objetivo de minimizar diferenças entre a ASW simulada e a ASW observada pelo modelo, se faz necessário o procedimento de calibração. Esses parâmetros (tabela 7) foram calibrados por tentativa e erro, até o momento em que se obtinha resultados estatisticamente aceitáveis para as condições estudadas.

Os valores do TAW encontrados (tabela 2 e 3) foram ligeiramente diferentes entre as áreas, devido às diferenças entre as umidades na capacidade de campo e ponto de murcha permanente. A partir do TAW pode-se calcular a água facilmente disponível ou fração de depleção permitida para a não ocorrência de stress ($RAW = TAW \cdot p$). O valor de p inicialmente assumido foi aquele recomendado por Allen et al. (1998).

Os dados de saída do modelo, consistem no balanço hídrico diário do solo conforme a seguinte equação:

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} (P - RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (5)$$

Sendo que a $D_{r,i}$ e $D_{r,i-1}$ é a depleção da zona radicular (mm) ao final de i e $i-1$ respectivamente; P_i é a precipitação (mm), RO_i é o escoamento superficial (mm); I_i é a irrigação (mm), CR_i a ascensão capilar; ET_c é a evapotranspiração da cultura (mm); DP_i é a percolação profunda (mm). Para o presente trabalho, a ascensão capilar foi desconsiderada.

Também como dados de saída do modelo se obtêm alguns coeficientes como o K_s e K_e , os quais são utilizados para ajustar o K_{cb} em condições de estresse hídrico ($K_{cb\ act}$), ajustando o K_c para $K_{c\ act}$.

$$K_{c\ act} = (K_{c\ b} \cdot K_s) + K_e \quad (6)$$

Tabela 9 - Coeficientes de cultura basal (K_{cb}), fração de depleção sem stress(p) e parâmetros de evaporação de água no solo, escoamento superficial e percolação profunda, padronizados e calibrados para áreas 1,2,3,4 e cenário II.

Parâmetros	1 calibrado	2 validado	3 Validado	4 validado	Cenário II validado
$K_{cb\ ini}$	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15
$K_{cb\ mid}$	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9
$K_{cb\ end}$	0,25	0,35	0,25	0,25	0,25
$p\ ini$	0,5	0,50	0,50	0,50	0,5
$p\ dev$	0,5	0,50	0,50	0,50	0,5
$p\ med$	0,5	0,50	0,50	0,50	0,5
$p\ end$	0,5	0,50	0,50	0,50	0,5
REW (mm)	8	8	47	46	29
TEW (mm)	46	38	8	10	10
Ze (mm)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,10
a_D	-	-	-	-	325
b_D	-	-	-	-	-0,005
CN	-	-	-	-	70

Fonte: Autores.

4.5 PRODUTIVIDADE DA ÁGUA (WP)

A fim de avaliar os dois cenários (seco e úmido) foram utilizados indicadores de produtividade da água (PEREIRA et al., 2012). Foi calculada a produtividade total da água (WP, Kg/ m⁻³), que é obtida através da razão produtividade real da cultura (Y_a , Kg) e o uso total da água (TWU, m³):

$$WP = \frac{Y_a}{TWU} \quad (7)$$

A produtividade da água da irrigação considera a produtividade da água da irrigação (WP_{irrig}, Kg /m⁻³), pela razão entre a produtividade real da cultura (Y_a , g/m⁻³) e o uso total da água da irrigação (IWU, kg/m³):

$$WP_{IRRIG} = \frac{Y_a}{IWU} \quad (8)$$

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para o presente estudo, utilizou-se um conjunto de indicadores estatísticos, visando relacionar os dados observados e simulados, tanto para a calibração como para a validação do modelo. Tais indicadores foram citados por Rosa et al., 2012b), Paredes et al. (2014), ÁVILA. (2016), Paredes et al. (2018), que também utilizaram o modelo SIMDualKc em seus trabalhos. Os indicadores estatísticos estudados foram:

O coeficiente de regressão (b_0), sendo que o mesmo é determinado a partir de uma regressão linear forçada à origem, para comparar dados observados e simulados, sendo que um (b_0), próximo a 1 demonstra alta relação entre os dados observados e dados simulados.

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i}{\sum_{i=1}^n O_i^2} \quad (9)$$

Coefficiente de determinação (R^2), onde valores próximos a 1 indicam que maior parte da variação dos dados simulados pode ser explicada pelo modelo, conforme a equação 8.

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad (10)$$

Para determinar as estimativas dos erros residuais utilizou-se como indicadores estatísticos a raiz quadrada do erro médio (RMSE) e do erro médio absoluto (AAE). Conforme (MORIASI et al., 2007), esses indicadores expressam a variância dos erros e o tamanho médio dos erros estimados respectivamente, foram calculados de acordo com as equações abaixo.

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (11)$$

$$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i - P_i \quad (12)$$

Outros indicadores foram utilizados, a fim de avaliar a qualidade da modelagem, como a eficiência da modelagem (EF), proposta por Nash e Sutcliffe (1970), que é razão entre erro quadrático médio e a variância nos dados observados, subtraído da unidade. Utilizado para determinar a magnitude relativa da variância residual em comparação aos dados medidos (MORIASI et al., 2007), a EF é dada pela equação que segue.

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (13)$$

Valores da eficiência da modelagem (EF) próximos a zero ou negativos, significam que a média dos valores observados é tão boa ou melhor que os dados simulados pelo modelo (LEGATES e McCABE, 1999, MORIASI et al., 2007).

A percentagem de viés (PBIAS) foi calculada para medir a tendência média dos dados simulados ser maior ou menor do que as observações correspondentes, conforme equação abaixo.

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \quad (14)$$

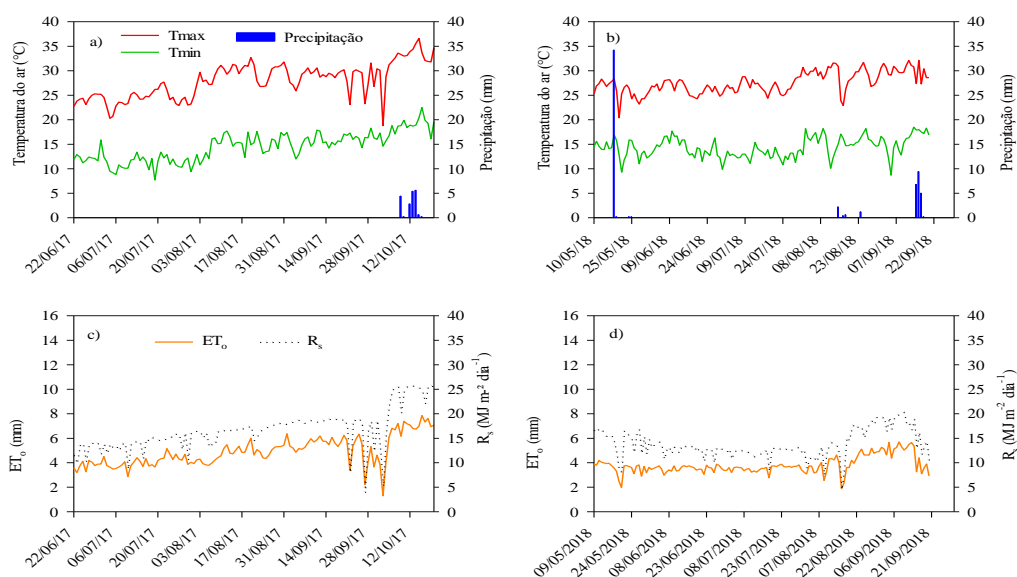
Valores próximo a zero ou igual a zero representam uma simulação exata. Entretanto valores positivos indicam uma subestimação do modelo e valores negativos uma sobre estimativa do mesmo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

Na figura 2 são apresentados os dados de temperatura máxima, mínima, radiação solar (R_s) e evapotranspiração de referência (ET_o), referentes aos anos de 2017 e 2018 no cenário I e II. Durante o ano de 2017, ao longo do ciclo de desenvolvimento do trigo, a temperatura máxima foi de $28,28^\circ\text{C}$, e a temperatura mínima foi de $15,46^\circ\text{C}$. A R_s média foi de $24,30 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$, enquanto a velocidade do vento se manteve $> 2 \text{ m s}^{-1}$ ($2,71 \text{ m s}^{-1}$) durante o ciclo da cultura. A elevada R_s , associada aos ventos constantes e umidade relativa do ar baixa resultam em elevada demanda evapotranspirativa da atmosfera. A umidade relativa do ar esteve sempre abaixo de 60% durante todo ciclo da cultura, sendo que, valores acima de 60% ocorreram quando houve eventos de precipitação.

Figura 2- Temperatura máxima (—, $^\circ\text{C}$) e mínima (—, $^\circ\text{C}$) e precipitação pluvial (■, mm)(a e b), radiação solar (... , MJ/m^2), evapotranspiração de referência (—, mm)(c e d) diários durante o período de cultivo de 2017 e 2018 no cenário I.



Fonte: Autores.

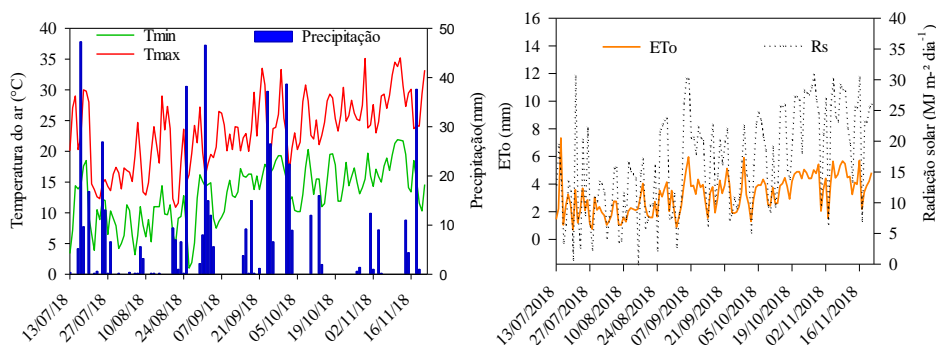
A precipitação pluvial observada ao longo do ciclo da cultura foi de 18.4 mm, ocorridos no final de setembro e início de outubro, fase final do ciclo da cultura. Observou-se que durante os períodos de experimentos, nos dois anos de estudo no cerrado brasileiro, as

temperaturas foram semelhantes. A temperatura máxima em média foi de 27,5°C e a mínima de 14°C. A variável R_s foi menor no ano de 2018 em média de 13,8 MJ/m² em relação ao ano anterior, que obteve uma média de 16,10 MJ/m². O mesmo foi observado com a ET_0 que foi inferior em 2018 com média diária de 3,81mm, sendo que em 2017 a média diária foi de 4,71mm.

Em comparação às normais climatológicas apresentadas na tabela 8, com observações realizadas durante o período dos dois anos de estudo no cenário I, o fator precipitação esteve abaixo das médias normais nos dois anos, sendo que, apenas no mês de setembro de 2018 ficou acima, quando comparado com a média normal.

Para o cenário II, em Santa Maria (Figura 3), referente ao ano de 2018, apenas no mês de outubro se observou índices pluviométricos inferiores (Figura 3) em relação às médias normais (Tabela 9). Temperaturas máximas e mínimas foram superiores às médias normais nos meses de setembro e novembro. A umidade relativa média do ar foi de 74,2% ao longo do ciclo; valores elevados foram observados quando ocorreram elevados eventos de precipitação.

Figura 3 - Temperatura máxima (—, °C), temperatura mínima (—, °C), precipitação pluvial (■, mm) (a), radiação solar (..., MJ/m²) e evapotranspiração de referência (— ET_0 , mm) (b) dados diários durante o período de cultivo no cenário II.



Fonte: Autores.

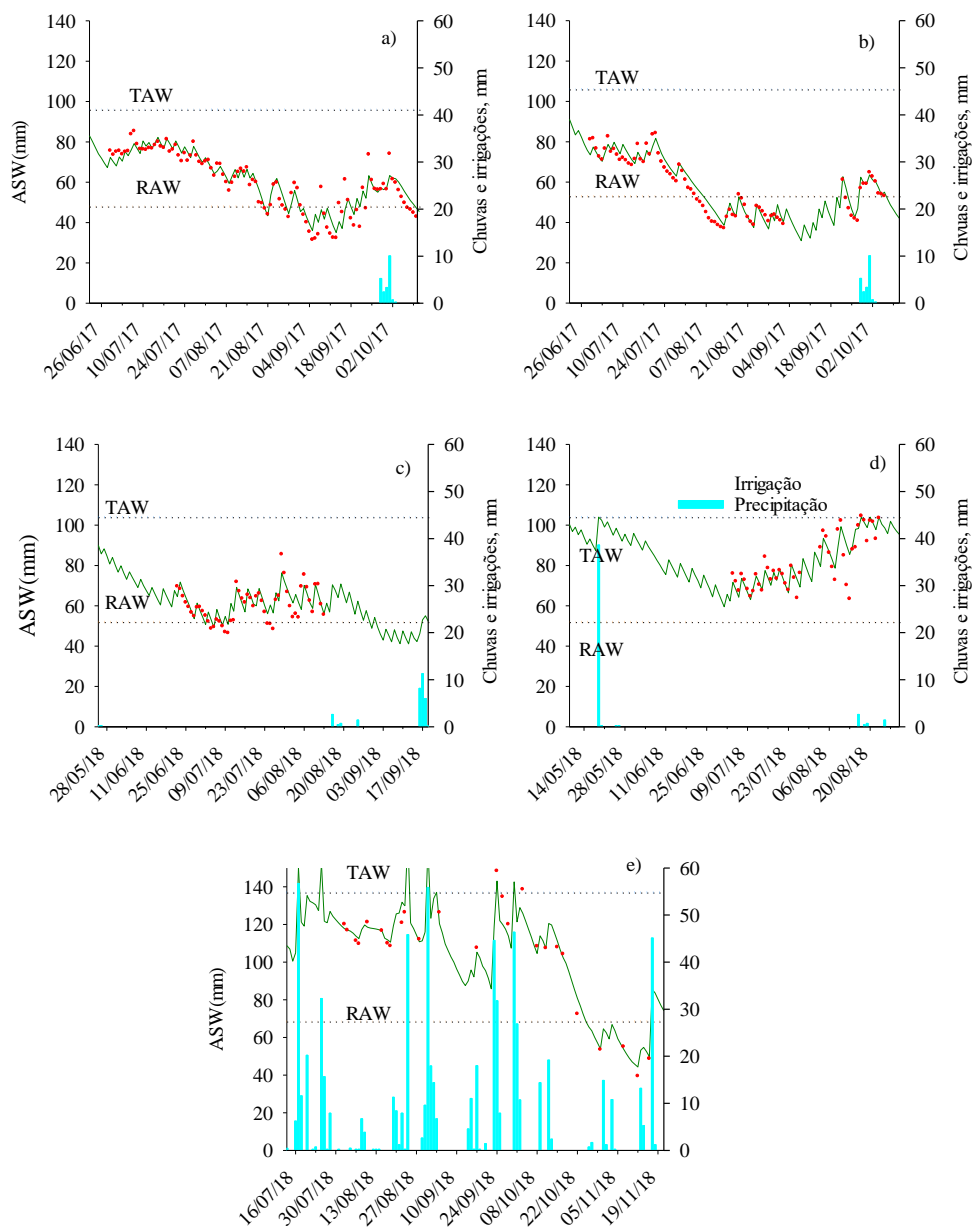
5.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DA MODELAGEM DE ÁGUA NO SOLO

Para realização do procedimento de calibração do modelo SIMDualKc, foi utilizada a área 1, e a validação foi realizada com as demais áreas (cenário I) e o cenário II. Os resultados da ASW observada e simulada para os dois cenários climáticos avaliados, assim como as irrigações e as chuvas, são apresentados na figura 4. Observou-se uma boa concordância entre

a ASW observada e simulada, mostrando que a simulação da dinâmica da água durante todo o ciclo da cultura foi satisfatória.

No ano de 2017 (Figuras 4a e b), foram observados períodos de deficiência hídrica no solo, dado que a ASW ficou abaixo do limite crítico estabelecido para a não ocorrência de stress (RAW). Na área 1, o déficit hídrico ocorreu durante o período compreendido entre o 69 ao 87

Figura 4 - Comparação diária entre a água disponível no solo (ASW, mm) observada e simulada, para áreas a) 1, b) 2, c) 3, d) 4 em Cristalina (GO), e cenário II, em Santa Maria(RS), com a cultura do trigo, sendo ● dados observados e — dados simulados. As colunas representam (■ irrigações, mm) e (■, precipitação, mm). As linhas horizontais representam o total de água disponível no solo (....., TAW, mm), e a água prontamente disponível no solo (....., RAW, mm), em Cristalina (GO) e Santa Maria (RS), nos anos de (2017) e (2018).



dias após a semeadura (DAS), caracterizado como estágio intermediário de cultivo. Na área 2, o déficit hídrico ocorreu mais cedo em relação a área 1, iniciando aos 44 DAS, na transição entre o período em que a planta apresenta um rápido incremento em altura e IAF e a fase reprodutiva, durante o período denominado de crescimento rápido. Em ambas as áreas, o período do déficit ocorreu nos estágios fenológicos de maior demanda hídrica da cultura, acarretando na redução da produtividade. Essa deficiência hídrica pode ter ocorrido em função do aumento do consumo de água (a partir da metade de agosto), como também da menor reposição de água, uma vez que, as lâminas de irrigação aplicadas foram pequenas, embora com mais frequência. A aplicação de menores lâminas de irrigação ocasionou um progressivo secamento do solo nas camadas mais profundas do perfil, fato que motivou a ocorrência do déficit.

O déficit hídrico se caracteriza quando a água facilmente disponível no solo se esgota, fazendo com que a planta transpire menos que o potencial. A redução na transpiração é dada pelo coeficiente de estresse, o qual é associado ao K_{cb} , conforme a seguinte equação $ET_{c\ act} = (K_{cb} \cdot K_s) + K_e \times ET_o$. Rosa et al. (2012a), em estudo realizado com trigo, verificou a ocorrência do déficit hídrico na cultura, quando 1/3 da linha da ASW permaneceu abaixo da RAW, com um valor de $K_s < 1$, usando irrigação suplementar. Em estudo realizado por Paredes et al. (2017), com a cultura da ervilha, os resultados mostram que a irrigação supriu a necessidade da cultura, de modo que o déficit hídrico não foi evidenciado, pois a linha da ASW se manteve acima do limiar relativo ao estresse. Fatores climáticos adversos como elevadas temperaturas e radiação solar, ausência de precipitações e alta evapotranspiração durante o período de desenvolvimento da cultura, contribuíram para ocorrência do déficit.

No ano de 2018 (Figura 4c e d), não houve stress à cultura, o que era esperado, uma vez que, as áreas são irrigadas. Para o K_s se obteve valor igual a 1, indicando que a água que estava disponível no solo foi suficiente para suprir a demanda da cultura em todo ciclo. A ausência de déficit hídrico no ano de 2018 pode estar relacionado a dois fatores: a antecipação da semeadura em aproximadamente 30 dias, em relação a 2017 e aos fatores meteorológicos mais amenos. A antecipação da semeadura para o mês de maio propiciou que a cultura usasse melhor a água armazenada no solo, uma vez que, a temporada das chuvas se encerra em abril. Em geral, quando as semeaduras de inverno são feitas tardiamente, há a necessidade de fazer irrigações em pré-semeadura, de forma a elevar a umidade do solo e propiciar condições adequadas para a germinação e estabelecimento inicial. Em contrapartida, quando as semeaduras são realizadas em maio, os solos ainda armazenam umidade suficiente no perfil

para o estabelecimento adequado da cultura e apenas irrigações pequenas são recomendadas, visando manter a umidade adequada na camada evaporativa (camada superficial do solo).

No cenário II observou-se que ao final do ciclo, compreendido entre o período de 25/10/18 a 16/11/18, a ASW decresceu para abaixo da RAW, demonstrando que durante esse período ocorreu déficit hídrico. Tal estresse abiótico ocorreu ao final do ciclo, e também durante os meses de outubro e novembro a radiação solar e temperaturas do ar aumentaram gradativamente, conseqüentemente, a cultura fica mais suscetível a ocorrência ao déficit hídrico.

Os indicadores de qualidade da simulação estão apresentados na tabela 10. Os resultados demonstrando o bom desempenho do modelo SIMDualKc e sua capacidade de prever a variação da água disponível no solo nos dois cenários, podendo ser usado como ferramenta para o manejo da irrigação na cultura do trigo, como estudos comprovam: MIAO et al., (2016), ROSA et al., (2012b), ZHAO et al., (2013), todos para a cultura do trigo.

Tabela 10- Indicadores estatísticos relativo a quantidade de água no solo para área 1,2,3,4 e cenário II, com bases nas simulações usando o modelo SIMDualKc.

	Área	b ₀	R ²	RMSE (mm)	AAE (mm)	EF	PBIAS
2017	1	1,00	0,99	4,57	3,51	0,99	-0,89
	2	1,02	1,00	3,88	3,22	0,99	-3,2
	3	0,99	1,00	4,09	3,04	1,00	0,52
	4	1,01	1,00	4,66	3,78	1,00	-1,89
2018	Cenário 2	0,99	1,00	7,26	5,74	1,00	0,29

*b₀: coeficiente de regressão linear; R²: coeficiente de determinação; RMSE: raiz quadrado do erro médio; AAE: erro médio absoluto; EF: eficiência da modelagem; PBIAS: Percentagem de viés.

Fonte: Autores.

Pode-se observar que o coeficiente de correlação (b₀) ficou próximo a 1,0, para ambos os cenários, demonstrando que a ASW simulada pelo modelo representou bem a realidade de água no solo nas observações realizadas. O coeficiente de determinação (R²) ficou entre 0,99 e 1,00, indicando que maior parte das observações da água no solo podem ser explicadas pelo modelo.

Os erros de estimativas foram baixos, com um RMSE médio de 4.22 mm para o ano de 2017 e 5,33 mm para o ano de 2018, que representa cerca de 4% do TAW. A EF foi de 0,99 para áreas 1 e 2 e de 1.00 no ano de 2018, em ambos os cenários. Portanto, a magnitude relativa da variância residual é comparável à variância dos dados medidos

Os valores de PBIAS variaram de -0,89 a -3,20 entre as áreas; os valores negativos nas áreas 1, 2, e 4 indicam uma superestimação do modelo da ASW simulada em relação a observada. Para fins de manejo de irrigação, a superestimação do modelo em relação a ASW se torna prejudicial, pois não representa o real conteúdo de água no solo, aumentando os valores quando comparado com os reais. Qiu et al. (2015), em estudo realizado entre 2010 e 2012, com a cultura da pimenta na China, encontraram valores estatísticos semelhantes, demonstrando a qualidade do modelo. Trabalho realizado na parte ocidental do Uruguai, por Giménez et al. (2017), com soja, obtiveram indicadores estatísticos satisfatórios e similares usando o SIMDualKc.

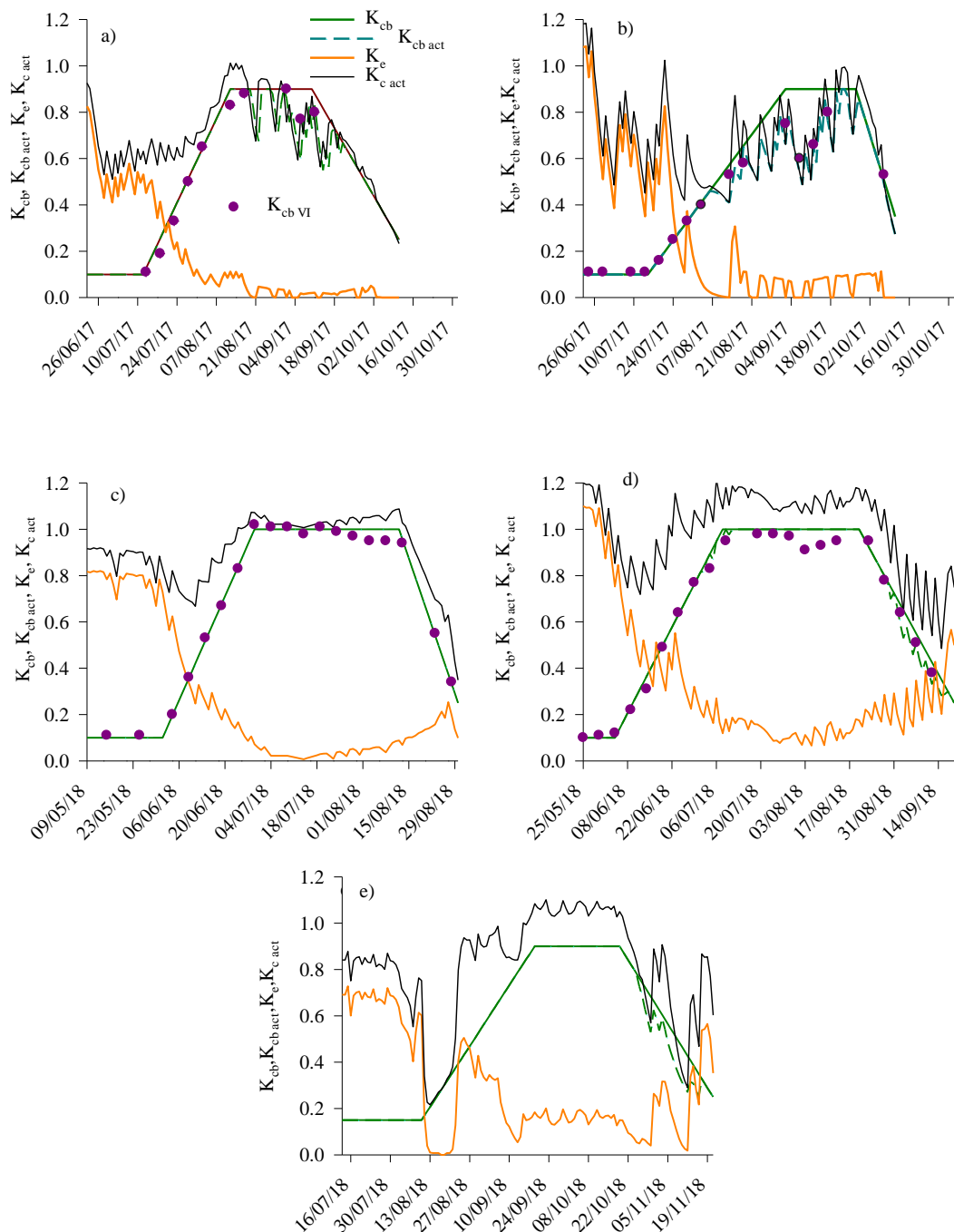
5.3 COEFICIENTES DE CULTURA

O coeficiente de evaporação (K_e), coeficiente de cultura basal (K_{cb}) coeficiente de cultura ajustado ($K_{cb \text{ act}}$) e coeficiente de cultura (K_c) foram estimados pelo modelo SIMDualKC, para os dois cenários climáticos, assim como também foram estimados os K_{cb} a partir do VI pelo processamento de imagens de satélites para o cenários I. Os coeficientes estão apresentados na figura 5. O coeficiente de evaporação (K_e) variou de 0,82 a 1,11 no cenário I, enquanto, no cenário II, o K_e máximo foi de 0,73. Analisando o comportamento do K_e a partir da figura 5, observou-se valores elevados de K_e para o cenário I, pois esse coeficiente está diretamente relacionado a presença ou não de “mulch” na superfície do solo e ao sombreamento do solo pelo dossel. Nesse cenário, o sistema de cultivo adotado é convencional (quando a cultura antecessora for o algodão) ou semeadura direta sobre resteva de milho ou soja. Tanto no sistema de implantação convencional, como no direto com pouca palha, a evaporação inicial é maior, principalmente devido a frequência de irrigações e exposição direta da superfície aos fatores meteorológicos. Após a fase inicial, durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, o K_e apresenta picos, devido ao molhamento do solo pela irrigação ou precipitação pluvial; menores valores são observados no período intermediário, quando a cobertura do solo pelo dossel é máxima, aumentando novamente no final do ciclo pela senescência da cultura. O detalhamento do sistema de rotação de culturas utilizado no cenário I é apresentado no Apêndice 1.

Observa-se que, quando ocorreu estresse hídrico no solo, o valor do K_{cb} é corrigido pelo K_s , computado através do balanço de água no solo. Quando os valores de K_s são menores que 1, indica considerável depleção da ASW, uma vez que o K_s é uma função linear da água

retirada da zona radicular das plantas. O K_{cb} para o período intermediário (de máximo consumo) foi ligeiramente superior no ano de 2018 ($K_{cb}=1,0$), no cenário I (figura 5c e d), quando comparado.

Figura 5 - Variação diária do coeficiente de cultura basal (K_{cb} , —), coeficiente de cultura basal ajustado ($K_{cb\ act}$, - - -), coeficiente de evaporação (K_e , —), coeficiente de cultura ajustado ($K_{c\ act}$, —), coeficiente basal por VI ($K_{cb\ VI}$, ●), ao longo do ciclo da cultura do trigo, para a) 1, b) 2, c) 3 e d) 4, e, e) cenário II.



Fonte: Autores.

ao ano de 2017 (Figura 5 a e b), quando o mesmo teve valor máximo de 0,9. O K_{cb} é influenciado pela disponibilidade de água no solo (PEREIRA et al., 2015) e, no ano de 2018, não se observou deficiência hídrica no solo (Figuras 4 c e d). Para este estudo foram encontrados valores de k_{cb} iniciais de 0,10 para o cenário I e 0,15 para o cenário II, valores esses inferiores ao padrão proposto por Allen et al. (1998). De acordo com Pereira (2007) e Irmak et al. (2013), valores de K_{cb} observados a campo podem se afastar do proposto por Allen et al. (1998), podendo essa variação ser explicada por condições climáticas do locais do estudo e práticas de manejo adotadas, como datas de semeadura e utilização de diferentes variedades.

No cenário II, de clima úmido, o $K_{cb\ act}$ se ajustou ao K_{cb} potencial durante a maior parte do ciclo, com exceção da fase final, quando se observou um leve stress de água no solo. Assim, o $K_{cb\ end}$ foi ligeiramente inferior àquele sugerido pela FAO. No modelo SIMDualKc, o coeficiente de cultura basal é ajustado, também, em função da fração da cobertura (fc) do solo pelo dossel ou do coeficiente de densidade da cultura (K_d). No ano de 2017, o trigo propiciou menor cobertura do solo, resultando em menor K_{cb} . El-Raki et al. (2007) estimaram o K_{cb} para a cultura do trigo em clima semiárido usando o NDVI, atestando a necessidade de associar a fração de cobertura do dossel para melhor estimar esse coeficiente. A necessidade de calibrar adequadamente o K_{cb} para diferentes cenários climáticos também foi atestado por Tolck e Howell (2001) e Zhang et al. (2011), particularmente quando ocorre estresse hídrico.

O $K_{cb\ end}$ obtido foi de 0,25 para todos os locais, com exceção da área 2, onde o valor foi de 0.35, estando de acordo com os propostos por Allen et al. (1998).

As diferenças entre os valores dos coeficientes de cultivo ao final do ciclo entre as diferentes áreas podem ser explicadas pelo manejo adotado e a utilização de cultivares diferentes (quanto ao ciclo). Observando as curvas do K_{cb} e $K_{cb\ act}$, percebe-se que há coincidência das mesmas no período de ocorrência de déficit hídrico nas áreas 1, 2 e 4 e no cenário II, de modo que na área 4 e cenário II foram déficits hídricos leves. Para a área 3, a curva do K_c manteve-se durante todo ciclo acima do $K_{cb\ act}$, demonstrando que não houve déficit hídrico. Em estudo realizado na planície do Marrocos por Rafi et al. (2019), os autores encontraram valores semelhantes para os coeficientes duais para a cultura do trigo.

O $K_{c\ med}$ encontrado foi de 0,9 para áreas 1 e 2, 1,00 para área 3 e 4 (cenário I) valores diferentes daqueles propostos por Allen et al. (1998), em função das datas de semeadura, duração do ciclo e condições climáticas. Na literatura valores superiores de $K_{c\ med}$ são encontrados por Rosa et al. (2012b), que obtiveram um $K_{c\ med}$ de 1.05 em Aleppo, na Síria,

Miao et al. (2016) relataram um valor de 1,15 em Hetao, valor semelhante ao encontrado por Zhao et al. (2013), em estudo realizado no norte da China, que encontraram o $K_{c\ med}$ de 1,13.

Em relação aos $K_{cb\ VI}$ na fase inicial foram obtidos valores de 0,10 nos dois anos de estudo de cenário I. Os $K_{cb\ med}$ encontrados foram semelhantes aos obtido pelo modelo SIMDualK, com valores de 0,88 para o ano de 2017 e 0,99 para o ano de 2018. O valor de 0,28 foi obtido para o $K_{cb\ end}$, valores semelhantes aos encontrados por Poças et al. (2015), em estudo realizado com a cultura da cevada em Portugal, quando obtiveram valores de $K_{cb\ ini}$ de 0,18 e $K_{cb\ med}$ de 0,87.

A tabela 11 apresenta os indicadores de ajustes dos coeficientes de cultura basal obtidos a partir o modelo de balanço de hídrico do solo SIMDualKC e estimado por meio de índice de vegetação ($K_{cb\ VI}$). O coeficiente de determinação (R^2) teve uma média de 0,96, demonstrando a proporção entre os valores estimados por sensoriamento remoto e aqueles simulados pelo modelo. Observou se uma pequena variância dos erros, com um RMSE entre 0,06 e 0,11; a EF foi em média de 0,90. Os valores de PBIAS demonstram subestimativa para as áreas 1 e 2, referente ao de 2017 e superestimativas para as áreas 3 e 4, no ano de 2018.

Tabela 11 - Indicadores para correlação entre os coeficientes de cultura basal simulado com SIMDualKc e estimado com índice de vegetação (K_{cbVI}).

Área	b_0	R^2	RMSE	AAE	EF	PBIAS
1	0,89	0,98	0,09	0,08	0,89	8
2	0,88	0,93	0,09	0,05	0,89	10,66
3	1,03	0,98	0,06	0,03	0,97	-3,29
4	1,13	0,95	0,11	0,08	0,84	-12,39

Fonte: Autores.

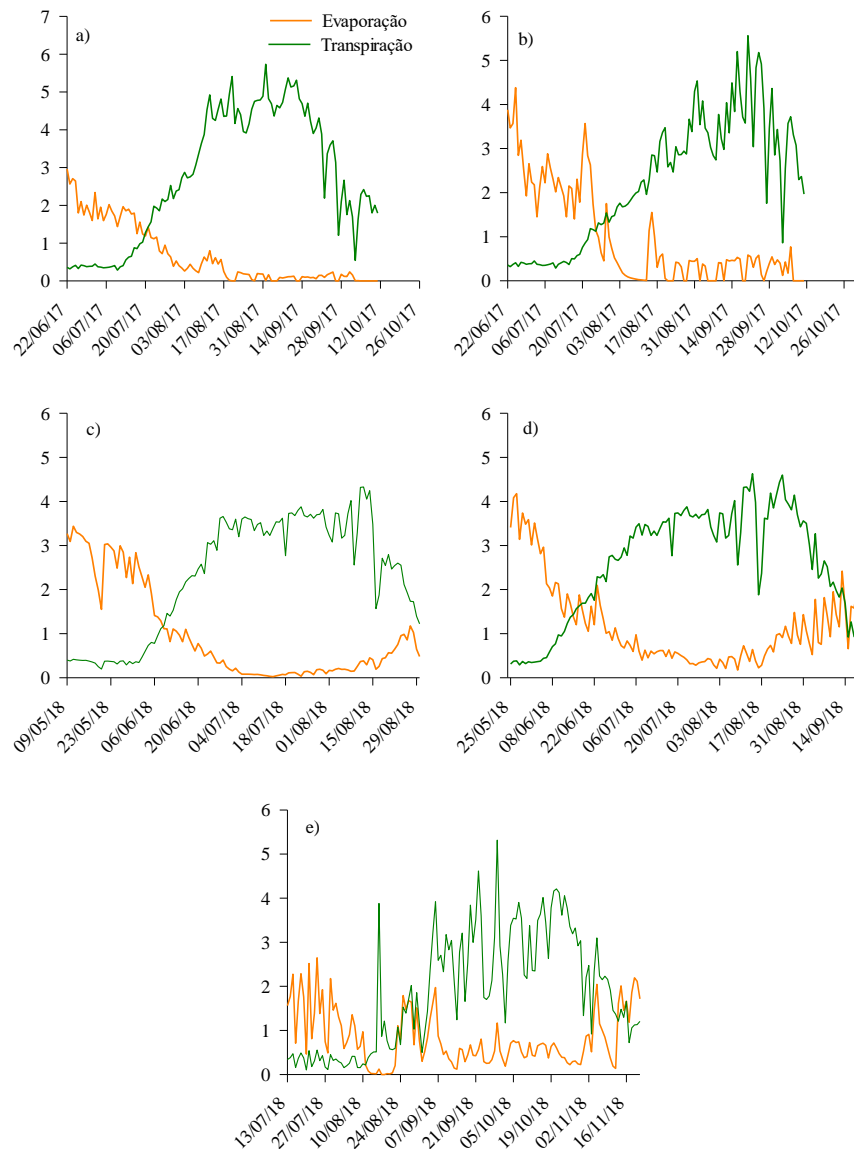
5.4 EVAPORAÇÃO DO SOLO E TRANSPIRAÇÃO DA CULTURA

Os resultados do particionamento da ET_c em evaporação do solo (E_s) e transpiração das culturas ($T_{c\ act}$) são apresentados na figura 6 e tabela 11. O processo de evaporação da água no solo, é influenciado por diversos fatores que atuam sobre a superfície do solo, tais como o manejo e preparo do solo para a sementeira, que acaba alterando a rugosidade da superfície, remoção da cobertura vegetal, desestruturação dos agregados, influência do sombreamento pela cultura que vai depender da densidade e da altura das plantas, além da umidade da

superfície do solo e disponibilidade de energia sobre a superfície do solo (ALLEN et al., 1998, 2005; ALLEN e PEREIRA, 2009).

Os maiores picos de evaporação ocorreram nos estádios iniciais (semeadura e estabelecimento da cultura) devido a reduzida área foliar das plantas, conseqüentemente, maior incidência de radiação solar na superfície do solo, sendo que radiação solar é um dos fatores externos que mais influenciam no processo de evaporação. A maior evaporação também

Figura 6 - Variação diária da evaporação do solo (E_s , mm, —) e transpiração da cultura (T_c , mm, —) do trigo, simulado pelo modelo SIMDualKc nas áreas 1(a), 2(b), 3(c) e 4(d), no cenário climático I, e no cenário climático II (e).



Fonte: Autores.

ocorreu devido a frequência de irrigações (cenário I), e no fim do ciclo, quando as plantas se encontravam em senescência, com reduzida área foliar.

Nas áreas 3 e 4, observou-se elevados índices evaporativos ao longo do ciclo. Além dos fatores citados acima, outro fator que contribuiu para essa maior E_s foi a ausência de palha da cultura antecessora, neste caso, o algodão, que deixa poucos resíduos, além de exigir a mobilização do solo, deixando o solo totalmente exposto, que contribui para a maior E_s .

A menor E_s foi observada na área 1 (76 mm), provavelmente devido a presença de resíduos culturais de milho, com densidade superior a 3 Mg/ha, contribuindo para a menor E_s . No cenário II, mesmo o solo sendo coberto por mulch, pela cultura antecessora, altos valores de evaporação no início e final do ciclo foram observados, totalizando 110 mm. Observou-se uma menor fração de cobertura, podendo ser característica da cultivar utilizada no local, e grandes volumes de precipitação, colaborando para o alto valor de E_s .

Tabela 12 - Evaporação da água do solo (E_s , mm), e transpiração da cultura ($T_{c\ act.}$, mm) para cada estágio de desenvolvimento da cultura do trigo, (2017 e 2018), em Goiás(GO), (2018) e cenário II, em Santa Maria, (RS).

Áreas	Fase inicial (mm)		Crescimento rápido (mm)		Fase intermediária (mm)		Fase final (mm)		Ciclo total (mm)		E_s/E_{t_c} (%)
	E_s	T_c	E_s	T_c	E_s	T_c	E_s	T_c	E_s	T_c	
1	28	5	44	117	2	75	2	88	76	285	21
2	61	9	38	103	7	96	4	41	110	249	31
3	67	9	28	56	6	156	11	44	112	264	30
4	38	4	46	67	20	153	37	83	141	306	32
Cenário II	39	9	24	69	16	91	31	76	110	246	31

Fonte: Autores.

Analisando os dados da tabela 11 e da Figura 6, percebe-se que, a acurácia na determinação da ET_c passa pela medição e/ou estimativa da E_s e T_c de forma separada. Medições da E_s comumente são feitas com lisimetria, micro ou minilísimetros, cujos valores são, em geral, superiores àqueles obtidos pelos métodos de estimativa, como o balanço de energia ou usando as equações modificadas de Ritchie (RITCHIE, 1972). A razão E_s/ET_c para culturas densas, como o trigo ou cevada, geralmente é da ordem de 30-40%, com alta variabilidade entre os valores (KOOL et al., 2013). No estudo em questão, apenas na área 1 foram encontrados valores abaixo dos relatados na literatura. Em estudo com cevada malteira

na região do Ribatejo, em Portugal, em que os autores aplicaram a aproximação dos coeficientes duais, os autores encontraram 21% (ano seco) e 23% (ano úmido), de razão E_s/ET_c .

A transpiração da cultura, relacionado com o rendimento das culturas, foi de 252 mm para área 1 e 306 mm para área 4. Os resultados obtidos para a cultura foram comparados com os de Rosa et al. (2012b), em estudo realizado com trigo, que obtiveram valores de 300 mm de transpiração e 99 mm de evaporação. Com a mesma cultura, Zao et al. (2013) observaram valores de 286 mm para transpiração e 116 mm para o componente de E_s . Com a cultura da cevada, Pereira et al. (2015), encontraram valores de 289 mm e 77 mm para a transpiração e evaporação, respectivamente. Em Santa Maria (cenário II) a fração da transpiração foi de 68% da ET_c .

5.5 COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO E USO DA ÁGUA

Os componentes do balanço hídrico, depleção inicial, irrigação, precipitação, percolação profunda, escoamento superficial e ET_c estão apresentadas na tabela 12. Pode-se, então, verificar diferenças pequenas entre as ET_c no cenário I, nas áreas 1, 2, 3 e no cenário II. Entretanto, na área 4, observou-se uma maior ET_c . As áreas 1, 2, e 3 e o cenário II tiveram variação semelhante na ET_c , ressaltando que nesses locais foi observado déficit hídrico, explicado nas variações de ASW (seção 4.1). Semelhanças na ET_c nesses locais podem ter feito com que a plantas aprofundassem seu sistema radicular, em busca de água para um melhor desenvolvimento. A variação da ASW (ΔASW), que é a diferença entre a ASW inicial e final, foi menor na área 3 (9 mm), indicando que, nesta área, a gestão da água de irrigação foi apropriada, uma vez que, não houve déficit, pelos parâmetros adotados, sendo possível manter a água no solo de forma a propiciar ótimo desenvolvimento da cultura.

Tabela 13- Componentes do balanço hídrico para as áreas do cenário I e II.

Áreas	Depleção inicial (mm)	I* (mm)	P (mm)	DP (mm)	Escoamento (mm)	Δ ASW	ET _c
1	10	302	18	0	0	51	361
2	11	287	18	0	0	64	358
3	0	365	37	35	0	9	376
4	11	380	26	0	0	52	447
Cenário II	27	0	625	240	57	55	356

I = irrigação (mm), P = precipitação pluvial (mm), DP = percolação profunda, Δ ASW = variação da água disponível no solo entre o início e final do ciclo; ET_c = evapotranspiração da cultura.

Fonte: Autores.

A ET_c para todo ciclo do trigo variou de 447 mm (cenário I) a 356 mm (cenário II), resultando em ET_c diária de 3,82 mm dia⁻¹ a 2,72 mm dia⁻¹, respectivamente. No cenário II, observou-se escoamento superficial de 57 mm, em decorrência de elevadas precipitações ocorridas no ciclo. As perdas por percolação profunda foram maiores que a T_c no cenário II (Tabela 12), fato não usual nas principais regiões de produção, mas característicos de anos de El Niño ou muitos úmidos, como foram os últimos anos em Santa Maria (Figura 4 e).

5.6 OBSERVAÇÕES E PREDIÇÕES DO RENDIMENTO

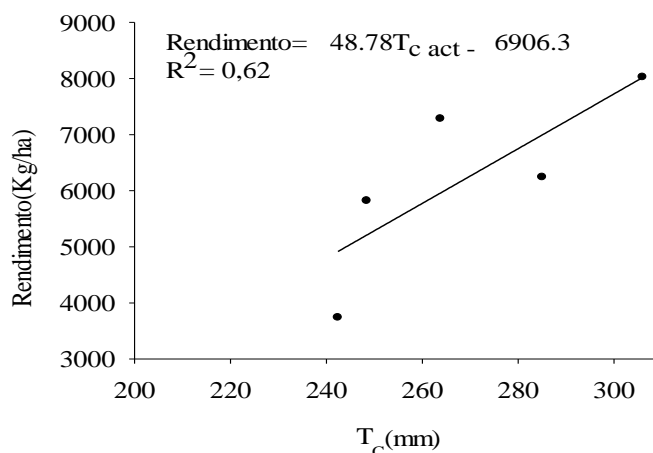
A associação entre a T_c da cultura nos diferentes cenários e o rendimento observado é apresentado na figura 7. Para as observações obtidas no ano de 2017 (rendimento fornecido pelo produtor), os rendimentos de grãos nas áreas 1 e 2 foram de 6.240 e 5.820 kg ha⁻¹, respectivamente. Em 2018, os rendimentos obtidos foram de 7.281 e 8.119,8 kg ha⁻¹, respectivamente, para as áreas 3 e 4. No cenário II, a produtividade observada foi de 3.737 kg ha⁻¹, rendimento esse acima da média do Rio Grande do Sul que, na safra de 2018, teve uma produtividade média de 2.746 kg ha⁻¹, entretanto, inferior quando comparada com rendimentos obtidos no cerrado. A associação entre produtividade e a T_c da cultura no estudo foi de 0,62 (R²), (figura 7), demonstrando interação significativa entre esses dois fatores.

Zang et al. (2017) encontraram a relação positiva entre rendimento de grãos e evapotranspiração da cultura (ET_c), em estudo realizado com trigo num sítio experimental no norte da China, com um R² de 0,479.

Resultados demonstram altos tetos de produção e qualidade de grãos, que são atingidos por diversos fatores, dentre elas, as variáveis meteorológicas que atuam de forma positiva, colaborando para tais resultados. Em contrapartida, o cenário II (da região sul), os principais problemas climáticos são relativos ao excesso de umidade, chuva durante a colheita, granizo, geadas, que contribuem para decréscimo de índices de produção e produtividade. No estudo realizado em Santa Maria, RS, ao final do inverno e início da primavera foram registrados altos volumes de precipitação pluviométrica, que coincidiram com os estádios fenológicos de espigamento, floração, maturação e proximidade da colheita. O excesso hídrico diminuiu o rendimento de grãos, peso de mil grãos e peso hectolitro, além de interferir negativamente na qualidade dos grãos. Foram também observados valores de umidade relativa alta, que também interferem no rendimento do trigo.

Apesar do cerrado apresentar uma área plantada muito inferior quando comparada com o Rio Grande do Sul, sua produtividade é muito superior quando comparada com a do sul do país, em dados da Conab. A produtividade média no cerrado foi de 5330 kg ha¹ e 5400 kg ha¹ para os anos de 2017 e 2018, respectivamente. No Rio Grande do Sul, a média esteve muito abaixo, quando comparado com o cerrado. Esses dados corroboram com os resultados encontrados nesse estudo, evidenciando uma grande diferença de produtividade entre os dois cenários, devido a diversos fatores, dentre eles a variabilidade climática.

Figura 7 - Relação entre rendimento de grãos (kg ha¹) e transpiração do trigo para os diferentes cenários climáticos avaliados.



Fonte: Autores.

5.7 PRODUTIVIDADE DA ÁGUA (WP)

A partir de observações realizadas a campo e por meio do modelo SIMDualKc, foi possível determinar o consumo de água pelas plantas e a produtividade. Valores de produtividade total da água (WP) e produtividade da água irrigada (WP_{IRRIG}) para a cultura do trigo estão apresentados na tabela 13, nos dois cenários de estudo. A melhor resposta ao uso da água foi observada no cenário I, para o ano de 2018, com $WP=1,77$, enquanto a menor WP foi observada no cenário II, com 0,55 kg produzidos por m^3 de água. A ligeira melhora na WP no cenário I em 2018, comparado a 2017, deve-se a antecipação da semeadura, que permitiu melhor uso da água armazenada no solo, associado a fatores climáticos mais favoráveis a obtenção de altos rendimentos. Embora as médias entre as $T_{máx}$ e $T_{mín}$ fossem semelhantes, a $T_{mín}$ foi consideravelmente menor desde a fase de floração até a colheita, no ano de 2018 (seção 4.1).

No cenário II, do sul do país, a menor WP obtida deve-se aos elevados índices de precipitações pluviométricas ocorridas durante o ciclo da cultura (acumulado 625 mm), isso se reflete no baixo valor encontrado de WP total (0,55). Visto que, quanto maior a lâmina aplicada de água, há decréscimo da WP. Valores semelhantes de WP foram encontrados por Zhang et al. (2017), que avaliaram as variações na ET_c e rendimento do trigo no norte da China, entre os anos de 1987 e 2015. A variação da WP ocorre devido a uma elevação no rendimento de grãos em relação ao total de água que ingressou na área ou o inverso. Por isso, é recomendável que a relação entre o rendimento e o uso da água seja dado em função do rendimento e da ET_c , para melhor avaliar o uso consuntivo da água. Valores encontrados no cenário I corroboram com os encontrados por Gao et al. (2014), em estudo realizado nos anos de 2010/2013, com trigo na China. Trabalho realizado por Zhang et al. (2019), com trigo na China encontraram uma WP de $1,48 \text{ kg m}^{-3}$ e $1,61 \text{ Kg m}^{-3}$, aplicando irrigação logo após a emergência da cultura. Abolpour (2018), trabalhando com trigo em Fars, província do Irã, obteve valores de WP de $1,50 \text{ kg m}^{-3}$. Sadias et al. (2018), em estudo realizado com trigo no ano de 2008 em clima mediterrâneo no Chile, encontrou valores entre 0,9 a $1,4 \text{ kg m}^{-3}$. Cabe salientar que o trigo tem uma maior eficiência do uso da água, em decorrência da sua origem das regiões semi-áridas.

Com relação a WP_{IRRIG} , observou-se um incremento dessa variável com o aumento da lâmina total de irrigação. Em geral, a WP_{IRRIG} decresce com o aumento da lâmina de irrigação (ZHANG et al., 2017), contrário ao encontrado nesse estudo.

Tabela 14- Rendimento de grãos de trigo (kg/ha^{-1}), irrigações aplicadas (mm), precipitações (mm), produtividade total da água (WP Total, kg m^{-3}) e produtividade total da água de irrigação (WP_{IRRIG}, kg m^{-3}) relativas as áreas 1,2,3,4, e cenário II.

Áreas	Rendimento observado (kg/ha^{-1})	Índice de colheita	Irrigação (mm)	Precipitação (mm)	WP (kg/m^{-3})	WP _{IRRIG} (kg/m^{-3})
1	6240	-	302	18,4	1,68	2,07
2	5820	-	287	18,4	1,58	2,03
3	7281	0,45	365	37,2	1,77	1,99
4	8120	0,47	380	26,2	1,77	2,14
Cenário II	3738	0,20	0	625	0,55	0

Fonte: Autores

5.8 ÍNDICE DE COLHEITA (IC)

O índice de colheita é expresso através da relação entre a matéria seca de grãos e matéria seca total das plantas, podendo ser influenciados pela densidade de plantio, disponibilidade de água e nutrientes e, temperatura na estação de crescimento (DURÃES et al., 2002). O índice de colheita foi analisado no ano de 2018 nas áreas 3 e 4, encontrando-se valores de 0,45 e 0,47, respectivamente. Na teoria, um maior valor de IC, demonstra que houve uma maior eficiência de produtos sintetizados em material de importância econômica.

Quando comparado o resultado de IC com rendimento de grãos entre as áreas, observa-se que a área 4 teve valor maior de IC, associado com maior rendimento de grãos, em relação a área 3. Os valores encontrados corroboram com os valores de estudos realizados com trigo por Zang et al. (2011) no norte da China e Saeidi et al. (2015), no Irã. Entretanto, Hu et al. (2019), em experimento também realizado na China, com diferentes datas de semeadura, encontraram valores de maior variação de IC entre 0,30 a 0,51, o que pode ter sido afetado pela forma de manejo adotado para o estudo.

Walter et al. (2018) obtiveram IC para o de trigo cultivado em diferentes densidades de semeadura na Austrália. Em média, o IC foi de 0,31, pois os valores variaram entre de 0,16 a 0,45. Dai et al. (2016), em estudo realizado em 2016 nos Estados Unidos, entre variedades de trigo, observaram valores entre 0,33 a 0,61 de IC, e concluíram que mais da metade da biomassa situada acima da superfície do solo está disponível para matéria prima anualmente quando o trigo é cultivado.

No cenário II foi observado valor médio de IC abaixo dos encontrados no estudo realizado no cerrado e na literatura. O valor de 0,20 de IC pode ser explicado devido a diversos fatores como a densidade de semeadura, eventos climáticos, como elevadas precipitações e menor disponibilidade de radiação solar. Em dias de chuvas, foi observado ausência ou pouca radiação solar, que afetaram diretamente a fotossíntese. Por isso, quando a disponibilidade de luz é baixa, a taxa de fotossíntese é muito pequena, de modo que esses índices baixos acarretam uma menor taxa de biomassa e, conseqüentemente, no rendimento.

6 CONCLUSÃO

O modelo de balanço hídrico do solo SIMDualKc foi calibrado e validado com resultados satisfatórios utilizando teores de água no solo para a cultura do trigo, em dois cenários climáticos contrastantes, um seco, referente ao cerrado brasileiro (Cristalina-GO) e outro úmido, na Depressão Central do Rio Grande do Sul (Santa Maria). Os indicadores de qualidade estatísticos mostraram que o coeficiente de relação e o coeficiente de determinação ficaram muito próximos a 1, os erros de estimativas foram baixos para ambos os cenários nos dois anos de estudos. Foi possível obter os coeficientes de culturas basais adequados e, ajustados de acordo com as condições climáticas de cada local.

O déficit hídrico foi observado no ano de 2017, no estágio fenológico reprodutivo, nas duas áreas estudadas, período em que ocorre maior demanda hídrica da cultura, o que acarretou em redução da produtividade da cultura.

O modelo SIMDualKc, apresenta-se como uma ferramenta apropriada para a calendarização e manejo de eventos de irrigação, assim como melhoria na produtividade da água para a cultura do trigo em cenários climáticos contrastantes no Brasil.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRHA, B et al. **Sowing strategies for barley (*Hordeum vulgare* L.) Based on modelled yield response to water with AquaCrop.** Experimental Agriculture, p. 252-271, 2012.
- ABOLPOUR, B. **Realistic evaluation of crop water productivity for sustainable farming of wheat in Kamin Region, Fars Province, Iran.** Agricultural Water Management, v.195, p. 94–103,2018.
- ALLEN, R. G et al. **Crop evapotranspiration.** Guidelines for computing crop water requirements, FAO irrigation and drainage paper 5. Rome, Italy: FAO, 300 p. 1998.
- 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, v.131, p. 2 -13,2005.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S. **Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height.** Irrigation Science. V.28, p.17-34,2009.
- ALLEN, R. G. et al. **Evapotranspiration information reporting: I, Factors governing measurement accuracy.** Agricultural Water Management, v.98, p.899–920, 2011.
- ALMEIDA, B. **Déficit e excesso hídrico na cultura do milho (*Zea mays* L.) em ambiente protegido,** Tese (Doutorado em Ciências – Engenharia de Sistemas Agrícolas) Universidade de São Paulo, 2016.
- ANDERSON, M.C. et al. **A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing.** Remote Sensing of Environment v.60, p.195–216,1997.
- ARYAL, J.P. et al. **A produção de trigo com base na agricultura de conservação lida melhor com os eventos climáticos extremos do que os sistemas convencionais baseados no cultivo: Um caso de excesso excessivo de chuvas em Haryana, Índia.** Agricultura, Ecossistemas e Meio Ambiente, v. 233, p.325-335, 2016.
- AVILA, V. **Balanço hídrico do solo e partição da evapotranspiração de soja, milho e feijão submetidos à irrigação deficitária no sul do Brasil.** Dissertação (mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, 2016.
- BAYGI, M.M. et al. **Avaliação de índices climáticos limitando o rendimento de trigo de sequeiro.** Indicadores Ecológicos, v.62, p.298-305, 2016.
- BELHOUCLETTE, H. E. et al. **Integrating spatial soil organization data with a regional agricultural management simulation model: A case study in northern Tunisia.** Transactions of the ASABE, v.51, p.1099-1109,2008.
- BIRD, A. R.; REGINA, A.; **High amylose wheat: A platform for delivering human health benefits.** Journal of Cereal Science, v. 82, p.99–105,2018.

CALERA BELMONTE, A.; JOCHUM, A.M.; GARCÍA, A.C. **Space-assisted irrigation management: Towards user-friendly products. In Proceedings of ICID Workshop on Use of Remote Sensing of Crop Evapotranspiration for Large Regions, Montpellier, France, 17 September 2003.**

CAMPOS, I. et al. **Combining a water balance model with evapotranspiration measurements to estimate total available soil water in irrigated and rainfed vineyards.** *Agricultural Water Management*, v. 165, 141–152, 2016.

CARDOSO, M. R. D.; MARCUZZO, F. N.; BARROS, J. R.; **Classificação climática de KÖPPEN-GEIGER para o estado de Goiás e o Distrito Federal.** *ACTA Geográfica, Boa Vista*, v.8, n.16, p.40-55, 2014.

CINTRA, F. L. D.; LIBARDI, P. L.; SAAD, A. M.; **Balço hídrico no solo para porta-enxertos de citros em ecossistema de tabuleiro costeiro.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.4, n.1, p.23-28, 2000.

CHEN, H. et al. **Long-term inorganic plus organic fertilization increases yield and yield stability of winter wheat.** *The crop journal*, vol. 6, p.589 – 599, 2018.

CONAB-Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>.

CUNHA, G.R. et al., **Zoneamento agrícola e época de semeadura para trigo no Brasil.** *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.9, n.3, p.400-414, 2001.

CUNHA, G. R. da. et al. **Regiões de adaptação para trigo no Brasil.** Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2006. 10 p. html. (Embrapa Trigo. Circular Técnica Online, 20). Disponível: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/ci/p_ci20.htm

DAI, J. et al. **Harvest index and straw yield of five classes of wheat.** *Biomass and Bioenergy*, v.85, p. 223 - 227, 2016.

DAAMEN, C.C.; SIMMONDS, L.P.; **Soil Water, Energy and Transpiration – A Numerical Model of Water and Energy Fluxes in Soil Profiles and Sparse Canopies.** Department of Soil Science, University of Reading, Reading,1994.

DE MORI, C.; ICNACZAK, J, C.; **Aspectos econômicos do complexo agroindustrial do trigo.** Embrapa Trigo. v.3, p. 41-76, 2011.

DINU, M. et al. **Ancient wheat species and human health: Biochemical and clinical implications.** *Journal of Nutritional Biochemistry*, v. 52, p.1–9, 2018.

DONATELLI, M. et al. **Evaluation of CropSyst for cropping systems at two locations of northern and southern Italy.** *European Journal of Agronomy*, p.35-45, 1997.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H.; **Yield response to water, In: FAO Irrigation and Drainage Paper 33,** FAO. Rome, p.193, 1979.

DRERUP, P.; BRUECK, H.; SHERER, H.W.; **Evapotranspiration of winter wheat estimated with the FAO 56 approach and NDVI measurements in a temperate humid climate of NW Europe.** *Agricultural Water Management*, v.192, p.180-188, 2017.

DUCHEMIN, B. et al., **Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices.** *Agricultural Water Management*, v.79, p.1-27, 2006.

DURÃES, F.O.M.; MAGALHÃES, P.C.; OLIVEIRA, A. C.; **Índice de colheita genético e as possibilidades da genética fisiológica para melhoramento do rendimento de milho.** *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v.1, p.33-40, 2002.

DZANKU, F.M.; JIRSTRO, M.; MARSTORP.; **Yield Gap-Based Poverty Gaps in Rural Sub-Saharan Africa.** *World Development*, v.67, p.336–362, 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, Embrapa Cerrados.
<http://www.cpac.embrapa.br/unidade/ocerrado/> Acesso: 05/02/19.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa do Solo – CNPS. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**, 2.ed. Rio de Janeiro, 2006, 306 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**, 2.ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 1997, 212p.

RIBEIRO, A., et al. **Pivotpoint América Latina.** *Valley* Ano 04, Nº 09, 76p. 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA EMBRAPA,
<https://www.embrapa.br>. Acesso 10/01/17.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa do Solo – CNPS. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**, 2.ed. Rio de Janeiro, 2006, 306 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**, 2.ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 1997, 212p.

FAOSTAT, 2018. Disponível em: <http://www.faostat.fao.org>.

FRANCIS, C. A. et al. A rapid method for plant leaf area estimation in maize (*Zea mays*). *Crop Science*, Madison, v.9, n.5, p.537-539, 1969.

GAO, Y. et al. **Winter wheat with subsurface drip irrigation (SDI): Crop coefficients, water-use estimates, and effects of SDI on grain yield and water use efficiency.** *Agricultural Water Management*, v.146, p.1–10, 2014.

GAVA, R. et al. **Estresse hídrico em diferentes fases da cultura da soja.** Revista Brasileira de Agricultura Irrigada v.9, n.6, p. 349 - 359, 2015.

GARCIA, G. A. et al. **Warm nights in the Argentine Pampas: Modelling its impact on wheat and barley shows yield reductions.** Agricultural Systems, v. 162, p. 259–268, 2018.

GAZZONI, D. L.; **Como alimentar 10 bilhões de cidadãos na década de 2050?** Revista Ciência e Cultura v.69, n.4, 2017.

GIMÉNEZ, L.; PAREDES, P.; PEREIRA, L.S.; **Water Use and Yield of Soybean under various irrigation Regimes and Severe Water Stress. Application of AquaCrop and SIMDualKc Models.** Water, v. 9, p.393, 2017.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M; **Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo – exatidão, precisão e tempo de processamento.** Ciência Rural, Santa Maria, v.36. n.2. p.664-668, 2006.

GRASSINI, P. et al. **High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: II, Irrigation management and crop water productivity.** Field Crops Research, v.120, 133–141, 2011.

GRASSINI, P.; YANG, H.; CASSMAN, K. G.; **Limits to maize productivity in Western Corn-Belt: a simulation analysis for fully-irrigated and rainfed conditions.** Agricultural and Forest Meteorology, v.149. p.1254–1265, 2009.

GRONT, E. W., **Variables influencing yield-scaled Global Warming Potential and yield of winter wheat production.** Field Crops Research, v. 227 p.19–29,2018.

HOEDJES, J. C. B. et al. **Deriving daily evapotranspiration from remotely sensed instantaneous evaporative fraction over olive orchard in semi-arid Morocco.** Journal of Hydrology, v.354 p.53-64, 2008.

HU, C. et al. **Root pruning enhances wheat yield, harvest index and water-use efficiency in semiarid area.** Field Crops Research, v.230, p.62–71, 2019.

INMET- Instituto Nacional de Meteorologia. <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em 15/01/18.

IRMAK, S.; KABENGE, I.; RUDNICK, D.; KNEZEVIC, S.; WOODWARD, D.; MORAVEK, M. **Coeficientes de safra de evapotranspiração para comunidades mistas de plantas ciliares e coeficientes de cultura de transpiração para o canal comum, Cottonwood e salgueiro de folha de pessegueiro na bacia do rio Platte, Nebraska-USA,** Jornal de hidrologia,V.481.P. 177-190, 2013.

KISZONAS, A. M.; MORRIS, C. F.; **Wheat breeding for quality: A historical review,** Wheat Quality Laboratory, Washington State University, Pullman, W.USA. 2017.

KOOL, D. et al. **A review of approaches for evapotranspiration partitioning.** Agricultural and Forest Meteorology, vol.184, p.56– 70, 2014.

KOTTEK, M. et al. **World map of the Koppen-Geiger climate classification updated**, Meteorologische Zeitschrift, v.15, n.3, p.259–263. 2006.

KUSTAS, W.P.; NORMAN, J.M.; **Evaluation of soil and vegetation heat flux pre-dictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover**. Agricultural and Forest Meteorology, v.94, p.13–29,1999.

LARGE, E.C. **Growth stages in cereals**. Plant Pathology, v.3, p.128-129, 1954.

LASCANO, R.J.et al. **Energy and water balance of a sparse crop: simulated and measured soil and crop evaporation**. Soil Science Society of America Journal, v.51, p.1113–1121, 1987.

LEGATES, D.; MCCABE, G.; **Evaluating the use of goodness of fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation**. Water Resources Research, v.35. p.233 – 241.

LIU, Y.; PEREIRA, L.; FERNANDO, R.; 2006, **Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation**. Agricultural Water Management, v.84, p.27–40,2006.

LOBELL, D. B., CASSMAN, K. G., FIELD, C. B. (2009). **Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes**. Annual Review of Environment and Resources, v.34, n.1, 179–204.

LOOMIS, R. S.; CONNOR, D. J.; **Crop Ecology, Productivity and Management in Agricultural Systems**, Cambridge University Press, Cambridge,1992.

MARTINS, J. D. et al. **Dual crop coefficients for maize in southern Brazil: model testing for sprinkler and drip irrigation and mulched soil**. Biosystem Engineering, v.115, p.291–310, 2013.

MARTINS, M. A. et al. **Calibração do modelo aquacrop para estimativa de rendimento de milho no semiárido do brasil**. XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia,2015

MAO, W. et al. **An efficient soil water balance model based on hybrid numerical and statistical methods**. Journal of Hydrology v.559, p.721–735, 2018.

MENGISTU, A.G.; RENSBURG, L.D.; MAVOMBELA, S.; **Shallow groundwater effects on evaporation and soil temperature in two windblown sands (Eutric Cambisol and Chromic Luvisol) in South Africa**. Geoderma Regional, v.15,2018.

MERLOS, F. A. et al. **Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps**. Field Crops Research v.184 p.145–154, 2015.

MIAO, Q. et al. **Modeling water use, transpiration and soil evaporation of spring wheat-maize and spring wheat-sunflower relay intercropping using the dual crop coefficient approach**. Agricultural Water Management, v.165. p.211-229, 2016.

MORI, C.; IGNACZAK, J. C.; **Aspectos econômicos do complexo agroindustrial do trigo**, In: PIRES, J. L. F.; VARGAS, L.; CUNHA, G. R. (eds.). Trigo no Brasil: bases para produção competitiva e sustentável. Passo Fundo: Embrapa Trigo, cap. 3. p. 41-76, 2011.

MORIASI, D. N., ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L.; **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations**. Trans, ASABE, v.50, n.3, p.885–900,2007.

NASH, J. E., SUTCLIFFE, J. V.; **River flow forecasting through conceptual models: part 1.A discussion of principles**, Journal of Hydrology., v.10, n.3, p.282–290,1970.

NASSIF, D. S. P.; **Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para as variedades brasileiras de cana-de-açúcar**, dissertação (Física do Ambiente Agrícola) Universidade de São Paulo- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”,2010.

NORMAN, J.M.; KUSTAS, W.P.; HUMES, K.S.; **Source approach for estimating soiland vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature**. Agricultural and Forest Meteorology, v.77, p. 263–293,1995.

PAÇO, T. A. et al. **Evapotranspiration and crop coefficients for a super intensive olive orchard. An application of SIMDualKc and METRIC models using ground and satellite observations**, Journal of Hydrology, v.519, p. 2067–2080,2014.

PAREDES, P et al. **Evapotranspiration Partition and Crop Coefficients of Tifton 85 Bermudagrass as Affected by the Frequency of Cuttings. Application of the FAO56 Dual Kc Model**, Water, v.10, p.558,2018.

PAREDES, P. et al. **Assessing potato transpiration, yield and water productivity under various water regimes and planting dates using the FAO dual Kc approach**, Agricultural Water Management, v.195, p.11–24, 2018.

PAREDES, P. et al. **Using the FAO dual crop coefficient approach to model water use and productivity of processing pea (*Pisum sativum* L.) as influenced by irrigation strategies**. Agricultural Water Management, vol.189, p. 5–18, 2017.

PAREDES, P. et al. **Partitioning evapotranspiration, yield prediction and economic returns of maize under various irrigation management strategies**. Agricultural Water Management, v.135, p.27–39, 2014.PAREDES, P. et al. **Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybeans in North China Plain**. Agricultural Water Management, v.152, p. 57–71, 2015.

PAULSEN, G. M.; SROVER, J. P.; SHROVER, K. J.; **Wheat: Agronomy**. Kansas State University, Manhattan, KS, USA 2016.

PEREIRA, L. S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I.; **Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving**. Agricultural Water Management, v.108, p.39–51, 2012.

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, v.159, p.239–254,2015.

- POCÂS, I et al. **Estimation of Actual Crop Coefficients Using Remotely Sensed Vegetation Indices and Soil Water Balance Modelled Data.** *Remote Sensing*, v.7, p.2373-2400,2015.
- QIU, R. et al. **Assessing the SIMDualKc model for estimating evapotranspiration of hot pepper grown in a solar greenhouse in Northwest China.** *Agricultural System*, v.138, p.1-9, 2015.
- RADA, N. **Avaliando o milagre agrícola do Cerrado no Brasil.** *Política Alimentar*, v.38 p.146-155, 2013.
- RAES, D. et al. **Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model.** *Agricultural Water Management*, v.81, p.335–357,2006.
- RAFI, Z. et al. **Partitioning evapotranspiration of a drip-irrigated wheat crop: Intercomparing eddy covariance-, sap flow, lysimeter and FAO-based methods.** *Agricultural and Forest Meteorology*, v.265, p.310–326, 2019.
- REICHARDT, K.; **A água em sistemas agrícolas**, Barueri (SP): Manole, 1990.
- RICHIE, J. T.; **Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover**, *Water Resources, Research*, v.8, p.1204–1213, 1972.
- RODRIGUES, G, J.; **Influência da irrigação e do manejo da desfolha sobre o balanço hídrico e produção de forragem de tifton 85**, Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria, 2017.
- ROSA, R. D. et al. **Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software, 1**, Background and computational strategy. *Agricultural Water Management*, v.103, p.8-24, 2012.
- ROSA, R. D. et al. **Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 2. Model testing.** *Agricultural Water Management*, v.103, p.62 -77, 2012.
- SADIAS, N. B. et al. **Tillage effects on the soil water balance and the use of water by oats and wheat in a Mediterranean climate.** *Soil & Tillage Research*, v.184 p.68–77, 2018.
- SAEIDI, M. et al. **Evaluation of drought stress at vegetative growth stage on the grain yield formation and some physiological traits as well as fluorescence parameters of different bread wheat cultivars.** *Acta Biologica Szegediensis*, v. 59, p.35-44, 2015.
- SANTOS, D. et al. **Cultivares de trigo submetidas a déficit hídrico no início do florescimento, em casa de vegetação.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*,v.16,2012 .
- SANTOS, G. O.; HERNANDEZ, F. B.T.; ROSSETTI, J.C.; **Balanço hídrico como ferramenta ao planejamento agropecuário para a região de Marinópolis, noroeste do estado de São Paulo.** *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* v.4, n.3, p.142–149, 2010.

SCHILS, R.; **Cereal yield gaps across Europe**. European Journal of Agronomy, v.101, p.109–120, 2018.

SHUTTLEWORTH, W. J; WALLACE, J.S.; **Evaporation from sparse crops – an energy combination theory**. Quarterly Journal. Royal. Meteorological Society, v.111, p.839–855,1985.

SILVA, A. C. et al. **Evapotranspiração e coeficiente de cultura do cafeeiro irrigado por pivô central**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.15, n.12, p.1215–1221, 2011.

SIMUNEK, J.; **The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.08. HYDRUS Software Series 3**. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, River-side, CA, USA, 2008.

SINGH, S. et al. **Estimating water balance, evapotranspiration and water use efficiency of spring safflower using the CROPGRO model**. Agricultural Water Management, v.185 p.137–144, 2017.

STEDUTO, P. et al. **AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles**. Agronomy Journal, v.101, n.3, p.426-437, 2009.

STEWART, J.; **Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil**. Reports Paper 67, Utah Water Research Laboratory, Logan, USA, 191 p, 1977.

TEIXEIRA, P.C et al. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3ed. p.287,2017.

TOLK, J.A.; HOWELL, T.A.; **Measured and simulated evapotranspiration of grain sorghum grown with full and limited irrigation in three high plains soils**. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers,v.44, p.1553-1558, 2001.

THOMPSON, A. L.; GILLEY, J.R.; NORMAN, J.M.; 1993a. **A sprinkler water droplet evaporation and plant canopy model**. I. Model development. Trans. ASAE, v.36, p.735–741,1993.

YIMAM, Y.T.; OCHSNER, T.E. KAKANI, V.G.; **Evapotranspiration partitioning and water use efficiency of switchgrass and biomass sorghum managed for biofuel**. Agricultural Water Management, v.155, p.40-47,2015.

YANG, H. S. et al. **Hybrid-maize-a maize simulation model that combines two crop modeling approaches**. Field Crops Research, v. 87, p.131-154, 2004.

YAU, S. K.; NIMAH, M.; FARRAN, M. **Early sowing and irrigation to increase barley yields and water use efficiency in Mediterranean conditions**. Agricultural Water Management, v.98, p.1776-1781, 2011.

ZHANG, X. et al. **Changes in evapotranspiration over irrigated winter wheat and maize in North China Plain over three decades**. Agricultural Water Management, v.98, p.1097–1104, 2011.

ZHANG, X. et al. **Responses of yield and WUE of winter wheat to water stress during the past three decades-A case study in the North China Plain.** *Agricultural Water Management*, v.179, p.47–54, 2017.

ZHANG, H. et al. **Effects of supplemental irrigation on the accumulation, distribution and transportation of ¹³C-photosynthate, yield and water use efficiency of winter wheat.** *Agricultural Water Management*, v. 214, p.1–8, 2019.

ZAO, N. N. et al. **Dual crop coefficient modelling applied to the winter wheat summer maize crop sequence in North China Plain: basal crop coefficients and soil evaporation component.** *Agricultural Water Management*, v.117, p.93-105, 2013.

USDA, **World Agricultural Production**, U.S. Department of Agriculture, Circular Series, 2018.

WALTER, J. et al. **Photogrammetry for the estimation of wheat biomass and harvest index,** *Field Crops Research*, v. 216, p.165–174, 2018.

WEI, Z.; **Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of soybean in North China Plain,** *Agricultural Water Management*, v.147. p.43-53, 2015.

APÊNDICE

Apêndice 1- Rotação das culturas referente às áreas irrigadas em Cristalina-GO e suas respectivas datas de semeadura.

Área	1	2	3	4
Cultura	soja	algodão	trigo	trigo
Data	12/10/2016	04/12/2015	20/05/2016	23/05/2016
Cultura	milho	soja	algodão	algodão
Data	07/02/2017	13/10/2016	12/12/2016	10/12/2016
Cultura	trigo	milho	soja	soja
Data	22/06/2017	02/02/2016	29/11/2017	02/12/2017
Cultura	-	trigo	trigo	trigo
Data	-	22/06/2018	09/05/2018	25/05/2018

Apêndice 2- Médias climáticas mensais registradas para Formosa-GO e Santa Maria- RS, no período entre 1981-2010.

Médias climáticas mensais registradas para Formosa-GO, no período entre 1981-2010 (INMET, 2019).

Variável	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
P (mm)	236	200	212	94	21	4.2	3.2	12	35	124	202	278
RH (%)	76.2	75.1	77.0	71.9	66.0	59.5	54.0	47.9	49.9	60.9	73.6	78.3
T _{max} (°C)	27.8	28.4	28.1	28.1	27.5	26.6	26.8	28.5	30.1	30.1	28.2	27.6
T _{min} (°C)	19.0	18.9	18.9	18.2	16.5	14.6	14.2	15.5	17.8	19.1	18.9	19.0
U ₂ (m/s)	2.1	2.0	1.9	2.1	1.9	2.0	2.3	2.3	2.3	2.2	2.1	2.0

*P é a precipitação (mm); RH é a umidade relativa média do ar; T_{max} é a média da temperatura máxima; T_{min} é a média da temperatura mínima; U₂ é a velocidade do vento a 2 metros de altura.

Médias climáticas mensais registradas para Santa Maria- RS, no período entre 1981-2010 (INMET, 2019).

Variável	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
P (mm)	166	139	127	170	154	149	159	111	158	173	132	154
RH (%)	72.3	76.8	78.5	81.3	83.3	83.7	81.8	78.9	78.5	76.3	70.6	68.7
T _{max} (°C)	30.9	29.9	29.1	25.7	22	19.7	19	21.4	22.1	25.2	27.8	30.3
T _{min} (°C)	19.8	19.4	18.5	15	12	10.3	9.4	10.5	11.9	14.8	16.4	18.6
U ₂ (m/s)	2.3	2.1	2	2	1.9	2.1	2.2	2.3	2.4	2.4	2.4	2.3

*P é a precipitação (mm); RH é a umidade relativa média do ar; T_{max} é a média da temperatura máxima; T_{min} é a média da temperatura mínima; U₂ é a velocidade do vento.

Apêndice 3-Comparação entre os dados de água disponível no solo (ASW, mm), observados e simulados pelo modelo SIMDualKc, nas áreas 1(a), 2(b),3(c) e (4) na fazenda Pamplona em Cristalina-GO e Cenário II(e) em Santa Maria-RS.

