

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

Leonardo Chechi

**MONITORAMENTO DO REQUERIMENTO HÍDRICO E
RENDIMENTO DE SOJA E MILHO VIA COMBINAÇÃO DE MODELO
DE BALANÇO HÍDRICO DO SOLO E SENSORIAMENTO REMOTO**

**Santa Maria, RS
2019**

Leonardo Chechi

**MONITORAMENTO DO REQUERIMENTO HÍDRICO E RENDIMENTO DE SOJA
E MILHO VIA COMBINAÇÃO DE MODELO DE BALANÇO HÍDRICO DO SOLO E
SENSORIAMENTO REMOTO**

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**.

Orientadora: Profa. Dra. Mirta Teresinha Petry

Santa Maria, RS
2019

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Finance Code 001

Cechi, Leonardo

MONITORAMENTO DO REQUERIMENTO HÍDRICO E RENDIMENTO DE SOJA E MILHO VIA COMBINAÇÃO DE MODELO DE BALANÇO HÍDRICO DO SOLO E SENSORIAMENTO REMOTO / Leonardo Cechi.- 2019.
99 p.; 30 cm

Orientadora: Mirta Teresinha Petry

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

1. SIMDualKc 2. Stewart 3. Evapotranspiração 4. Déficit hídrico I. Petry, Mirta Teresinha II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

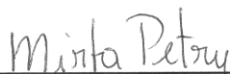
Declaro, LEONARDO CHECHI, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Leonardo Chechi

**MONITORAMENTO DO REQUERIMENTO HÍDRICO E RENDIMENTO DE SOJA
E MILHO VIA COMBINAÇÃO DE MODELO DE BALANÇO HÍDRICO DO SOLO E
SENSORIAMENTO REMOTO**

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.

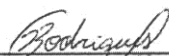
Aprovado em 13 de dezembro de 2019:



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



Zanandra Boff de Oliveira, Dra. (UFSM)



Geraldo José Rodríguez, Dr. (IFSC) - Videoconferência

Santa Maria, RS
2019

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Claudino Chechi e Dorvalina Maria Chechi, exemplos de dignidade, dedicação, humildade e comprometimento, valores que carrego sempre junto comigo.

AGRADECIMENTOS

Imensurável é o sentimento de felicidade e gratidão por chegar a este momento, não somente pelo título, mas pelo conhecimento adquirido e pelas pessoas que conheci durante a caminhada. Apesar de todas as dificuldades encontradas, sempre contei com orientação e companheirismo de pessoas que levarei sempre comigo. Dessa forma, sou grato pela oportunidade, de poder estudar, me desafiar e me desenvolver e agradeço:

Aos meus pais, Claudino e Dorvalina, irmãos, Juliana e Juliandro, cunhado Rodrigo e sobrinha Alice. A estes que foram os esteios da minha educação e da minha personalidade, são a base, a estrutura, os motivos e a força para que o caminho seja percorrido, o meu muito obrigado com eterno carinho e de todo coração.

Aos, demais familiares e amigos que sempre estiveram presentes vibrando, torcendo e incentivando pelo sucesso desta caminhada.

À Universidade Federal de Santa Maria, pública, gratuita e de qualidade, ao Centro de Ciências Rurais, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela possibilidade de realização deste curso e pela bolsa de estudos concedida.

Em especial à professora Mirta Teresinha Petry, pela orientação, conhecimento compartilhado e amizade. Aos colegas de pós-graduação, Max, Bruno, Robson, Lueni, Marília, Cassiane, Lethícia, Laudenir, Carlos, Ticiane e Maicon. Aos colegas de graduação do laboratório Sistema Irriga®, Diego, Felipe, Cassio, Mateus, Jéssica, Vinicius, Andressa, Giovana, Mariana, Anderson e Guilherme. E também os demais colegas que tive a oportunidade de conhecer, pela amizade ao longo dos anos de convívio, pelas dificuldades compartilhadas, certamente ficam grandes amizadas.

À professora Zanandra de Oliveira Boff pela coorientação, e juntamente com seus orientados de graduação, em especial aos alunos Clarissa Moraes, Irajá Jantsch de Souza e Tiago Link pela dedicação em auxiliar em diversas etapas do projeto, as quais muitas vezes abriram mão do tempo com sua família e amigos, para ajudar-me na execução de atividades a campo.

A todos aqueles que, de alguma maneira, ajudaram na realização deste trabalho, fica aqui, meu MUITO OBRIGADO.

“Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, que se sintam humildes. É assim que as espigas sem grãos erguem desdenhosamente a cabeça para o céu, enquanto que as cheias as baixam para a terra, sua mãe”.

Leonardo da Vinci

RESUMO

MONITORAMENTO DO REQUERIMENTO HÍDRICO E RENDIMENTO DE SOJA E MILHO VIA COMBINAÇÃO DE MODELO DE BALANÇO HÍDRICO DO SOLO E SENSORIAMENTO REMOTO

AUTOR: Leonardo Chechi

ORIENTADORA: Mirta Teresinha Petry

O aumento da população mundial tem resultado no aumento da demanda por alimentos, exigindo aumento da produtividade das culturas agrícolas. O déficit hídrico é o maior causador da redução no rendimento de grãos das culturas de primavera-verão no Rio Grande do Sul, necessitando-se de irrigações suplementares frequentemente, especialmente nos estádios mais críticos ao estresse hídrico. Para aumentar a produtividade e a eficiência dos recursos utilizados na produção agrícola, se faz necessário melhorar as metodologias existentes e procurar novas alternativas, que permitam avaliações mais precisas da demanda hídrica das culturas, bem como, das respostas das culturas à disponibilidade hídrica. Assim, o principal objetivo deste trabalho foi o de melhorar a estimativa da evapotranspiração das culturas (ET_c) da soja e do milho em condições subtropicais úmidas mediante a combinação de modelo de balanço hídrico do solo SIMDualKc e índices de vegetação derivados do sensoriamento remoto. O trabalho visa ainda fracionar a evaporação do solo (E_s) e transpiração atual das culturas ($T_{c\ act}$) e relacionar a $T_{c\ act}$ com o rendimento a partir de funções empíricas para as culturas do milho e soja no Rio Grande do Sul. O presente estudo foi composto de quatro etapas: (i) calibração e validação do modelo SIMDualKc; (ii) calibração e validação da estimativa da fração de cobertura (f_c) e do índice de área foliar (IAF) com o NDVI; (iii) validação do SIMDualKc com f_c e IAF a partir do NDVI; e (iv) aplicação das fases S1 e S2 do modelo SIMDualKc-Stewart para a estimativa do rendimento de grãos. As etapas i e ii constituíram-se de experimentos de campo, realizados em área irrigada e de sequeiro, no ano agrícola de 2018/19, na Depressão Central do RS, com as culturas milho (safra) e soja (safrinha). Para a etapa iii utilizou-se áreas comerciais irrigadas e de sequeiro, das principais regiões produtoras do Rio Grande do Sul, incluindo a Depressão Central, o Planalto Médio e as Missões, relativos aos anos agrícolas 2017/18 e 2018/19. A etapa iv consistiu da calibração e validação do modelo SIMDualKc-Stewart para todas as áreas do estudo. A utilização do modelo SIMDualKc combinado com o índice de vegetação NDVI foi eficiente em simular o balanço hídrico do solo, particionando a evapotranspiração em E_s e $T_{c\ act}$. A eficiência da simulação foi comprovada pela aplicação de indicadores estatísticos, apresentado RMSE variando de 2,96 a 6,52% da TAW para a soja e milho. Para o modelo SIMDualKc-Stewart, a fase S2 foi mais precisa para estimar o rendimento de grãos, apresentando um RMSE de 0,32 e 0,86 Mg ha⁻¹, para soja e milho, respectivamente. Dessa forma, a metodologia abordada no estudo se mostrou eficiente para a estimativa da evapotranspiração e balanço hídrico, bem como, avaliar a resposta das culturas à disponibilidade hídrica nas principais regiões produtoras de grãos do Rio Grande do Sul, com diversidade de solo e condições meteorológicas.

Palavras-chave: SIMDualKc. Stewart. Evapotranspiração. Déficit hídrico.

ABSTRACT

MONITORING WATER REQUIREMENT AND GRAIN YIELD FOR SOYBEAN AND MAIZE THROUGH COMBINATION OF SOIL WATER BALANCE MODEL AND REMOTE SENSING

AUTHOR: Leonardo Chechi
ADVISOR: Mirta Teresinha Petry

The increase in world population has resulted in increased demand for food, requiring increased crop productivity. Water stress is the major limiting factor for grain yield of spring-summer crops in Rio Grande do Sul, frequently requiring supplemental irrigation, especially in the most critical stages of water stress. In order to increase productivity and inputs use efficiency, current methodologies need to be improved and new alternatives sought to allow more accurate assessments of crop water requirement as well as crop response to water availability. In this way, the main objective of this work was to improve the estimation of the crop evapotranspiration (ET_c) for soybean and corn under subtropical humid conditions by combining SIMDualKc soil water balance model and vegetation indices derived from remote sensing. In addition, the study sought to access soil evaporation (E_s) and actual crop transpiration ($T_{c\ act}$), and relate $T_{c\ act}$ to grain yield by applying empirical functions for corn and soybean crops in Rio Grande do Sul. The study methodology was composed of four steps: (i) calibration and validation of the SIMDualKc model; (ii) calibration and validation of the fraction of soil covered (f_c) and leaf area index (LAI) estimated with NDVI; (iii) validation of SIMDualKc with f_c and LAI derived from NDVI; and (iv) application S1 and S2 phases of the SIMDualKc-Stewart model to estimate grain yield. Steps i and ii consisted of field experiments carried out in irrigated and rainfed areas, in 2018/19 crop season, in the Depressão Central region of RS, with corn (first crop) and soybean (second crop). The areas used in step iii are farm areas and located in the major producing regions of Rio Grande do Sul state, including the Depressão Central, the Planalto Médio and Missões during the 2017/18 and 2018/19 crop seasons. In each farm a central pivot irrigated area and a rainfed area were used, when available. For stage iv, all study areas were used for calibration and validation of the SIMDualKc-Stewart model. The use of the SIMDualKc model combined with the NDVI vegetation index was efficient in simulating soil water balance by partitioning $ET_{c\ act}$ into E_s and $T_{c\ act}$. The efficiency of the simulation was proved by the application of statistical indicators, with RMSE ranging from 2.96 to 6.52% of TAW among all soybean and corn crops areas. For the SIMDualKc-Stewart model the S2 phase was more accurate for grain yield estimation, where the RMSE was of 0.32 and 0.86 Mg ha⁻¹, for soybean and corn, respectively. Thus, the methodology presented in the study proved to be efficient for the estimation of $ET_{c\ act}$ and soil water balance, as well as the crop response to water availability for soybean and maize grown in the main producing regions of Rio Grande do Sul state, in diversified conditions of soil and climate.

Key words: SIMDualKc. Stewart. Evapotranspiration. Water deficit.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Temperatura máxima (—, °C) e mínima (—, °C) do ar, precipitações (—, mm), R_s (—, $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e ET_o (—, mm) para as áreas 2 - Cachoeira do Sul (a), 3 - Catuípe (b), 4 - São Luiz Gonzaga (c) e 5 - São Luiz Gonzaga (d) no ano agrícola de 2017/18, no Rio Grande do Sul. 44
- Figura 2 - Temperatura máxima (—, °C) e mínima (—, °C) do ar, precipitações (—, mm), R_s (—, $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e ET_o (—, mm) para as áreas 1 - Cachoeira do Sul (a), 6 - Panambi (b) e 7 - São Luiz Gonzaga (c) no ano agrícola de 2018/19, no Rio Grande do Sul. 45
- Figura 3 - Temperatura máxima (—, °C) e mínima (—, °C) do ar, precipitações (—, mm), R_s (—, $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e ET_o (—, mm) para as áreas 2 - Panambi (a) e 3 - São Luiz Gonzaga (b), no ano agrícola de 2017/18, no Rio Grande do Sul. 46
- Figura 4 - Temperatura máxima (—, °C) e mínima (—, °C) do ar, precipitações (—, mm), R_s (—, $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e ET_o (—, mm) para as áreas 1 - Cachoeira do Sul (a), 4 - São Luiz Gonzaga (b) e 5 - Catuípe (c), do ano agrícola de 2018/19, no Rio Grande do Sul. 47
- Figura 5 - Variação diária da água disponível no solo simulada (ASW_{sim}) e observada (ASW_{obs}) para a soja irrigada (a - calibração), soja sequeiro (b - validação), milho irrigado (c - calibração) e milho sequeiro (d - validação) na área 1. Linhas tracejadas representam o total de água disponível (— —, TAW, mm) e a água facilmente disponível (---, RAW, mm) e barras verticais representam as precipitações e irrigações. Safra 2018/19, Rio Grande do Sul. 51
- Figura 6 - Comparação entre os valores observados (ASW_{obs}) e simulados (ASW_{sim}) de água disponível no solo para a soja irrigada (a - calibração), soja de sequeiro (b - validação), milho irrigado (c - calibração) e milho de sequeiro (d - validação) na área 1, na safra 2018/19, no Rio Grande do Sul. 52
- Figura 7 - Variação diária do coeficiente de cultivo basal (K_{cb}), coeficiente de cultivo basal atual ($K_{cb \text{ act}}$) coeficiente de evaporação (K_e) e coeficiente de cultivo atual ($K_{c \text{ act}}$) para a soja irrigada (a - calibração), soja de sequeiro (b - validação), milho irrigado (c - calibração) e milho de sequeiro (d - validação) na área 1, no ano agrícola 2018/19, no Rio Grande do Sul. 53
- Figura 8 - Relação entre a fração de cobertura obtida por NDVI ($f_{c \text{ NDVI}}$) e a fração de cobertura observada ($f_{c \text{ obs}}$) da soja irrigada (a - calibração) e de sequeiro (b - validação) na área 1. Os indicadores estatísticos apresentados são, o coeficiente linear (b_0) e o coeficiente de determinação (R^2), a porcentagem de viés (*P-bias*), a raiz quadrada do quadrado médio do erro (RMSE) e o número de observações (n). 55
- Figura 9 - Calibração e validação de regressão para a estimativa do índice de área foliar em função do NDVI derivado de imagens de satélites, utilizando dados observados do cultivo de milho irrigado (a - calibração) e sequeiro (b - validação) na área 1. Os indicadores estatísticos apresentados são, o coeficiente linear (b_0) e o coeficiente de determinação (R^2), a porcentagem de viés (*P-bias*), a raiz quadrada do quadrado médio do erro (RMSE) e o número de observações (n). 56
- Figura 10 - Variação diária da água disponível no solo (ASW) simulada (ASW_{sim}) e observada (ASW_{obs}) para a soja irrigada, nas áreas 2 (a), 3 (b), 4 (c), 5 (d), do ano agrícola 2017/18 e 6 (e) e 7 (f), no ano agrícola 2018/19, no Rio Grande do Sul. Linhas tracejadas representam o total de água disponível (— —, TAW, mm) e a água

	facilmente disponível (---, RAW, mm) e barras verticais representam as precipitações e irrigações.....	59
Figura 11	- Variação diária da água disponível no solo simulada (ASW_{sim}) e observada (ASW_{obs}) para o milho irrigado nas áreas 2 (a), 3 (b), 4 (c) e 5 (d). Linhas tracejadas representam o total de água disponível (--- , TAW, mm) e a água facilmente disponível (---, RAW, mm) e barras verticais representam as precipitações e irrigações, nos anos agrícolas de 2017/18 e 2018/19, no Rio Grande do Sul.....	60
Figura 12	- Variação diária do coeficiente de cultivo basal (K_{cb}), coeficiente de cultivo basal atual ($K_{cb\ act}$) coeficiente de evaporação (K_e) e coeficiente de cultivo atual ($K_{c\ act}$) para a soja irrigada (a, c, e) e sequeiro (b, d, f), nos ano agrícola de 2017/18, no Rio Grande do Sul.	62
Figura 13	- Variação diária do coeficiente de cultivo basal (K_{cb}), coeficiente de cultivo basal atual ($K_{cb\ act}$) coeficiente de evaporação (K_e) e coeficiente de cultivo atual ($K_{c\ act}$) para a soja irrigada na safrinha, na área 5, em São Luiz Gonzaga , nos anos agrícolas de 2017/18 (a) e 2018/19 (b), no Rio Grande do Sul.....	63
Figura 14	- Variação diária do coeficiente de cultivo basal (K_{cb}), coeficiente de cultivo basal atual ($K_{cb\ act}$) coeficiente de evaporação (K_e) e coeficiente de cultivo atual ($K_{c\ act}$) para a soja irrigada (a,) e de sequeiro (b), no anos agrícola de 2018/19 , no Rio Grande do Sul.	63
Figura 15	- Variação diária do coeficiente de cultivo basal (K_{cb}), coeficiente de cultivo basal atual ($K_{cb\ act}$) coeficiente de evaporação (K_e) e coeficiente de cultivo atual ($K_{c\ act}$) para o milho nas área 2 (a), 3 (b), irrigadas, 4 (c e d), 5 (e e f), irrigadas e de sequeiro, respectivamente, para os anos agrícolas de 2017/18 e 2018/19, no Rio Grande do Sul.	64
Figura 16	- Rendimento observado (Y_a , $Mg\ ha^{-1}$) em função da transpiração atual ($T_{c\ actual}$ - mm) (a e b), do déficit transpiratório (T_d - mm) (c e d), e do déficit de rendimento (Y_{def} , $Mg\ ha^{-1}$) em função do déficit transpiratório (T_d - mm) (e, e f) para a soja e milho, nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/29, no Rio Grande do Sul.	74
Figura 17	- Relação entre os valores de rendimento de grãos da soja (a e b) e milho (c e d) observados e simulados pela abordagem SIMDualKc-Stewart fase S1 (a e c) e S2 (b e d). Os indicadores estatísticos apresentados são o coeficiente linear (b) e o coeficiente de determinação (R^2), a porcentagem de viés (<i>P-bias</i>), a raiz quadrada do quadrado médio do erro (RMSE) e o número de observações (n).	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações gerais sobre as áreas cultivadas com soja e milho utilizadas para esse estudo, nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/2019, no Rio Grande do Sul.	30
Tabela 2 - Caracterização físico-hídrico dos solos das áreas que compõem o estudo, cultivadas com soja e milho, nos anos agrícolas de 2017/18 e 2018/2019, no Rio Grande do Sul.....	32
Tabela 3 - Informações sobre as culturas da soja e do milho (data de semeadura e colheita, cultivares/híbridos, espaçamento entre linhas de cultivo e cultura antecessora) para os diferentes locais de estudo, nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/2019, no Rio Grande do Sul.	33
Tabela 4 - Altura da cultura (h) e fração de cobertura (f_c) em soja irrigada e de sequeiro, na Área 1, na safra de 2018/19.....	34
Tabela 5 - Índice de área foliar (IAF), altura de plantas (m) e fenologia do milho cultivado na área 1, irrigado e sequeiro, no ano agrícola de 2018/19, no Rio Grande do Sul.	34
Tabela 6: Total de água disponível (TAW) e total de água facilmente disponível (RAW) para os cultivos de soja e milho, nos anos agrícolas de 2017/18 e 2018/19, no Rio Grande do Sul.....	35
Tabela 7 - Parâmetros para a estimativa da fração de cobertura (f_c) utilizando índice NDVI, nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/2019, no Rio Grande do Sul.	40
Tabela 8 - Valores iniciais e calibrados dos coeficientes basais de cultivo (K_{cb}), depleção para não estresse (p), e parâmetros de evaporação do solo, escoamento superficial e percolação profunda, para os cultivos de soja e milho irrigado (calibração) e de sequeiro (validação) na área 1.	48
Tabela 9 - Valores validados dos parâmetros de evaporação do solo, escoamento superficial e percolação profunda, para a soja, nas áreas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 e milho, nas áreas 2, 3, 4 e 5, nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/19, no Rio Grande do Sul.	57
Tabela 10 - Indicadores estatísticos entre valores observados (ASW_{obs}) e simulados (ASW_{sim}) de água disponível no solo para as áreas de soja e milho, nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/19, no Rio Grande do Sul.	61
Tabela 11 - Componentes do balanço hídrico relativo as culturas da soja, nas áreas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 e milho, nas áreas 1, 2, 3, 4 e 5, simulados pelo modelo SIMDualKc, nos anos agrícolas de 2017/18 e 2018/19, no Rio Grande do Sul.	66
Tabela 12 - Evaporação de água do solo (E_s , mm) e transpiração da cultura (T_c , mm) em cada estágio de desenvolvimento da cultura da soja nas áreas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, conforme modelo SIMDualKc, nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/19, no Rio Grande do Sul.....	70
Tabela 13 - Evaporação de água do solo (E_s , mm) e transpiração da cultura ($T_{c,act}$, mm) em cada estágio de desenvolvimento da cultura do milho irrigado e de sequeiro, nos anos agrícolas de 2017/18 e 2018/19, no Rio Grande do Sul.....	71
Tabela 14 - Rendimento (Y_a) e déficit de rendimento (Y_{def}) ($Mg\ ha^{-1}$) para as áreas avaliadas de soja e milho, nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/29, no Rio Grande do Sul.	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS*

a_D e b_D	Parâmetros para estimativa de percolação
ASW	Água disponível no solo (mm)
b_0	Coefficiente de regressão
CN	Curva Número
E_s	Evaporação da água do solo (mm)
ET_c	Evapotranspiração da cultura (mm)
$ET_{c\ act}$	Evapotranspiração da cultura ajustada (mm)
ET_o	Evapotranspiração de referência (mm)
f_c	Fração de solo coberto pelo dossel vegetativo
h	Altura da planta (m)
K_c	Coefficiente de cultura
K_{cb}	Coefficiente de cultura basal
$K_{c\ act}$	Coefficiente de cultura real
$K_{cb\ end}$	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_e	Coefficiente de evaporação
K_s	Coefficiente de estresse
K_y	Fator de resposta ao rendimento
IAF	Índice de área foliar
p	Fração de depleção da água do solo para condição sem estresse
<i>P-bias</i>	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 no solo (mm)
TEW	Água total evaporável (mm)
T_c	Transpiração da cultura (mm)
$T_{c\ act}$	Transpiração atual da cultura (mm)
T_d	Déficit transpiratório da cultura (mm)
Z_e	Espessura da camada com água evaporável (m)
Z_r	Comprimento radicular (m)
Y_a	Rendimento observado (Mg)
Y_{def}	Déficit de rendimento (Mg)
Y_m	Rendimento potencial (Mg)

*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	14
2. HIPÓTESES	17
3. OBJETIVOS	18
3.1. OBJETIVO GERAL.....	18
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
4. REVISÃO DE LITERATURA	19
4.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DAS CULTURAS.....	19
4.2. ESTIMATIVA DO REQUERIMENTO HÍDRICO DAS CULTURAS.....	21
4.3. COEFICIENTES DE CULTIVO.....	22
4.4. ÍNDICES DE VEGETAÇÃO DERIVADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO....	24
4.5. FUNÇÕES EMPÍRICAS DE ÁGUA-PRODUÇÃO.....	27
5. MATERIAL E MÉTODOS	29
5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS DE CAMPO E OBSERVAÇÕES...29	
5.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DO SOLO.....	30
5.3. BASE DE OBSERVAÇÕES DE CAMPO.....	33
5.4. DADOS METEOROLÓGICOS DIÁRIOS.....	37
5.5. MODELAÇÃO: APLICAÇÃO DO MODELO SIMDualKc.....	37
5.6. ESTIMATIVA DA f_c E DO IAF ATRAVÉS DE NDVI.....	39
5.7. FUNÇÕES EMPÍRICAS DE ÁGUA-PRODUÇÃO.....	41
5.8. INDICADORES ESTATÍSTICOS.....	43
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
6.1. CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS.....	44
6.1. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO SIMDualKc.....	48
6.2. ESTIMATIVA DO $f_{c\text{NDVI}}$ E IAF_{NDVI}	54
6.3. VALIDAÇÃO DO MODELO SIMDUALKC COM $f_{c\text{NDVI}}$ e IAF_{NDVI}	57
6.4. PARTICIONAMENTO DA ET_c : COEFICIENTES DE CULTIVO DUAL.....	61
6.5. COMPONENTES DO BALAÇO HÍDRICO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA.....	65
6.6. ESTIMATIVA DO RENDIMENTO DE GRÃOS.....	72
7. CONCLUSÃO	80
REFERÊNCIAS	82
ANEXOS	93

1. INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial acelerou a demanda por alimentos, tendo a agricultura como principal esteio para garantir a segurança alimentar. Devido a essa elevada demanda por alimentos, houve grande expansão e intensificação da agricultura, desafiando o setor agrícola a aumentar a produtividade das culturas, sobretudo aquelas de caráter alimentar.

Trigo, arroz e milho são responsáveis por aproximadamente dois terços do total de calorias diárias necessárias (FAO, 2018), enquanto a soja é responsável pelo fornecimento de 60% do óleo e 70% da proteína consumida (SOYSTAT, 2019). Assim, aumentar a produtividade dessas culturas é mandatório para a segurança alimentar do planeta, em termos de volume produzido. Esforços têm sido feitos em experimentos agrícolas visando incrementar o rendimento e minimizar o impacto ambiental, entretanto, os resultados muitas vezes são específicos do local e sujeitos à variação temporal e espacial do material genético, das condições meteorológicas e do solo (BASSO et al., 2011). Essa variabilidade espacial e temporal dificulta a produção sustentável, sobretudo porque o cultivo dessas commodities ao redor do mundo é afetada pelas alterações climáticas e estresses ambientais (ZIPPER; QIU; KUCHARIK, 2016), principalmente o estresse ocasionado pelo déficit de água no solo.

O déficit hídrico é o maior causador da redução na produção das culturas de primavera-verão no Rio Grande do Sul (BERGAMASCHI et al., 2007), sendo causado pela distribuição irregular das precipitações pluviais e elevada demanda evaporativa da atmosfera (ZIPPER; QIU; KUCHARIK, 2016). Assim, devido à incerteza na distribuição das precipitações durante o ciclo das culturas, irrigações suplementares são frequentemente requeridas, especialmente nos estádios mais críticos ao estresse hídrico (YAU; NIMAH; FARRAN, 2011). Entretanto, como a agricultura é a maior consumidora de água, a irrigação deve ser manejada de forma a evitar desperdícios e como fator de aumento da produção (PEREIRA; CORDERY; IACOVIDES, 2012). Dentre as etapas para se incrementar a produtividade da água, ou seja, aumentar a eficiência no uso deste recurso, tem-se a melhoria nas estimativas do requerimento hídrico das culturas, isto é, a evapotranspiração das culturas (ET_c).

Quantificar o requerimento hídrico das culturas de forma mais exata significa melhorar as metodologias existentes e procurar novas alternativas, que permitam avaliações mais precisas (CARLESSO; PETRY; TROIS, 2009; CARLESSO et al., 2011; ALLEN et al. 2011a; b). A solução mais lógica para minimizar o consumo de água e realizar uma programação da irrigação mais ajustada, é ampliar o conhecimento a respeito da ET_c , o que implica

necessariamente na obtenção de coeficientes de cultura (K_c) mais precisos, para as principais culturas de expressão econômica no Brasil.

O monitoramento das culturas e seu requerimento hídrico pode ser obtido através da combinação de modelos do balanço hídrico (BH), sensoriamento remoto e informações meteorológicas (GARRIDO-RUBIO et al., 2018; CALERA et al., 2017). Modelos de BH, quando bem calibrados e validados, fornecem estimativas acuradas da ET_c , bem como derivando os coeficientes de cultura (simples ou duais). Tradicionalmente, a ET_c é determinada a partir da multiplicação da evapotranspiração de referência (ET_o) por um coeficiente de cultivo (K_c) ou por um coeficiente de cultivo dual (ALLEN et al., 1998). Para o segundo, adota-se um coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) e um coeficiente de evaporação de água do solo (K_e). Rosa et al. (2012a; b), baseado na metodologia do K_c dual, propuseram o modelo SIMDualKc, o qual computa o BH a partir de dados meteorológicos, dados do solo, irrigações, características da cultura e dos valores de K_{cb} previamente calibrados.

Valores de K_{cb} calibrados para diversas culturas, em locais variados são facilmente encontrados na literatura (WEI et al., 2015; GIMÉNEZ et al., 2017; PAREDES et al., 2014a; DING et al., 2013; ZHAO et al., 2013; ZHANG et al., 2013; PEREIRA et al., 2015a; PAREDES et al., 2018a; PAREDES et al., 2018b). Para a cultura do milho no Rio Grande do Sul, Martins et al. (2013) calibraram os valores de K_{cb} para a região de Santa Maria. No entanto, devido a evolução dos híbridos disponíveis no mercado e das práticas de manejo, principalmente densidade, arranjo espacial das plantas e duração do ciclo, adequações são necessárias, de forma a melhorar tanto a calendarização, como a gestão da irrigação.

A utilização de índices de vegetação derivados de sensoriamento remoto (RS) tem se tornado uma ferramenta de grande importância, para a calibração e validação de modelos agrícolas (RICHETTI et al., 2019; CAMPOS et al., 2017a; b; POÇAS et al., 2015a; PRASAD et al., 2006; BASTIAANSEN e ALI, 2003; NEALE et al., 2012). Isto é possível pela correlação existente entre índices de vegetação (VI) e características morfofisiológicas das culturas, como o índice de área foliar (IAF), a fração de cobertura do solo (f_c), matéria seca da planta e outros processos fisiológicos que dependem da absorção de radiação pelo dossel, incluindo a ET_c (POÇAS et al., 2015a; NEALE et al., 2012).

O desenvolvimento de calendários de irrigação para lidar com a disponibilidade real de água no solo requer o conhecimento das respostas das culturas à água, que pode ser alcançado por meio da modelagem. Alguns estudos têm demonstrado a eficácia da utilização de funções empíricas de água-produção para prever o rendimento (JENSEN, 1968; PAREDES et al.,

2014a; b). As aproximações mais comuns relacionam o rendimento à evapotranspiração ou transpiração (STEWART et al., 1977; DOORENBOS; KASSAM, 1979), ou estimam o rendimento a partir do crescimento e acumulação de biomassa, a exemplo do CERES-Maize (JONES; KINIRY, 1986), EPIC (CAVERO et al., 2000) ou o AquaCrop (HSIAO et al., 2009). Entretanto, os modelos orientados a processos demandam um elevado número de informações para a sua parametrização, como datas, nutrientes, características genéticas e propriedades hidráulicas do solo. Conseqüentemente, modelos empíricos que relacionam o rendimento ao consumo de água se constituem em melhor alternativa, mesmo que o presente indique um significativo aumento no uso de modelos determinísticos.

2. HIPÓTESES

O conhecimento diário da ET_c das culturas pode ajudar na decisão de quando e quanto irrigar, visando aumentar o rendimento das culturas, ao mesmo tempo em que reduz os custos com a irrigação e possíveis impactos ambientais. Informações acuradas da ET_c podem ser obtidas a partir da estimativa do balanço hídrico do solo, sobretudo nas culturas sob déficit hídrico, além de avaliar o impacto desse estresse no rendimento das culturas. Assim, o presente trabalho tem como hipóteses que:

- (i) O modelo SIMDualKc é eficiente em estimar o balanço hídrico do solo, particionando a ET_c em E_s e T_c quando devidamente calibrado;
- (ii) O índice de vegetação NDVI é uma alternativa para a estimativa das variáveis morfológicas como a f_c e o IAF;
- (iii) O IAF e a f_c estimados pelo NDVI podem ser utilizados para a estimativa do balanço hídrico pelo modelo SIMDualKc;
- (iv) O modelo SIMDualKc-Stewart é eficiente em estimar o rendimento de grãos de soja e milho no Rio Grande do Sul a partir da transpiração da cultura.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GERAL

O principal objetivo deste trabalho foi determinar o balanço hídrico do solo a partir da combinação do modelo SIMDualKc e índices de vegetação e relacionar a transpiração e do déficit de transpiração da cultura com o rendimento e o déficit de rendimento a partir de funções empíricas para as culturas da soja e do milho no Rio Grande do Sul.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com a realização do presente trabalho foi possível: (i) calibrar os coeficientes de cultivo basal (K_{cb}) e o coeficiente de depleção (p) para a não ocorrência de estresse a partir da aplicação do modelo SIMDualKc; (ii) combinar o modelo SIMDualKc com o índice de vegetação NDVI para a determinação do balanço hídrico a partir da f_c NDVI ou IAF_{NDVI} e; (iii) relacionar o rendimento e o déficit de rendimento da soja e milho com a transpiração e o déficit transpiratório e aplicar as diferentes fases do modelo de SIMDualKc-Stewart para a estimativa do rendimento de grãos dessas culturas.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DAS CULTURAS

Com uma produção mundial de 1,033 bilhões e 336,70 milhões de toneladas e ocupando uma área de 183,63 e 124,05 milhões de hectares no mundo, o milho e a soja, respectivamente, apresentam-se como duas das principais culturas agrícolas do mundo. O milho, cereal mais produzido e consumido no mundo, tem como principais países produtores os Estados Unidos, China e Brasil, enquanto a soja, leguminosa mais produzida e consumida no mundo, tem como principais países produtores Estados Unidos, Brasil e Argentina (USDA, 2018).

O Brasil, com uma área cultivada de 16,80 e 35,10 milhões de hectares de milho e soja, respectivamente, ocupa o lugar de terceiro maior produtor mundial de milho e segundo maior produtor mundial de soja, com produção total de 83,50 e 119,50 milhões de toneladas, respectivamente, tendo como principais usos a alimentação animal, humana e a produção de biocombustíveis (USDA, 2018). De acordo com Cattelan e Dall'Agnol (2018), a soja é a principal cultura brasileira, tanto em escala, como em volume, apresentando expansão em área, produção e produtividade, desde a década de 1960, com acentuado crescimento a partir da década de 1980. O milho, por sua vez, ocupa o segundo lugar em termos de importância econômica para o país (VAN BENTHEM, 2013).

O Rio Grande do Sul ocupa o posto de sexto e terceiro maior produtor de milho e soja, tendo na safra 2016/17 uma produção de 6,04 e 18,72 milhões de toneladas, em uma área de 804, 90 mil e 5,57 milhões de hectares de milho e soja, respectivamente (CONAB, 2018). No estado, juntamente com o arroz, a soja e o milho são as culturas de maior interesse econômico. De acordo com o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) para a cultura de milho (PORTARIA Nº 119) e para a cultura da soja (PORTARIA Nº 154), estas culturas podem ser cultivadas em praticamente todas as regiões do RS, em diferentes tipos de solo e com uma ampla janela de semeadura. No entanto, o ZARC aponta a disponibilidade de água para as plantas como uma das principais causas de diminuição na produtividade em cultivos de sequeiro. Dessa forma, a utilização de sistemas de irrigação que visam suplementar a disponibilidade hídrica as plantas se configuram em ferramentas estratégicas para a manutenção de altas produtividades.

A produtividade média de grãos de soja no estado é de 3,36 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2018), sendo reportados produtividades de até 7,60 Mg ha⁻¹ (CESB, 2018). O potencial de rendimento

da soja é expresso pela interação entre o genótipo e o ambiente, sendo que a disponibilidade hídrica apresenta papel primordial no desenvolvimento da planta e no rendimento de grãos de soja (BATTISTI; SENTELHAS; BOOTE, 2017). A demanda por água aumenta progressivamente com o desenvolvimento da cultura da soja, atingindo o máximo no florescimento até o início da formação de legumes e se mantém alta até a maturação (THOMAS; COSTA, 2010). Os períodos críticos da cultura à falta de água são o estabelecimento da cultura (germinação e emergência) e a fase reprodutiva (THOMAS; COSTA, 2010).

O milho apresenta produtividade média de 7,50 Mg ha⁻¹ no RS (CONAB, 2018), no entanto, resultados experimentais em áreas irrigadas de forma suplementar apontam para um rendimento potencial de até 13,21 Mg ha⁻¹ (RODRIGUES et al., 2013) em Portugal e de aproximadamente 14,00 Mg ha⁻¹ para o sul do Brasil (SCHWALBERT et al., 2018). Sangoi et al. (2010) destacam que a deficiência hídrica é o fator ambiental que mais limita a obtenção de altos rendimentos de grãos de milho no Brasil, especialmente no estado do Rio Grande do Sul, onde, apesar da ocorrência de totais acumulados de precipitação elevados, a mesma não ocorre de forma uniforme e nos momentos onde a planta mais necessita.

De acordo com Martins et al. (2016), o Rio Grande do Sul possui 1753 sistemas de irrigação por pivô central, que ocupam uma área de 111,12 mil hectares, distribuídos nas principais regiões produtoras de grãos. A maior concentração destes sistemas ocorre nas regiões fisiográficas do Planalto Médio, Alto Uruguai e Missões, regiões tradicionais no cultivo de milho e soja. Entretanto, excluindo-se a área irrigada com arroz irrigado no estado, apenas 2% da área cultivada com outras culturas é irrigada. Portanto, há um grande potencial de expansão da irrigação nas culturas da soja e milho no RS.

Para um adequado manejo da suplementação das necessidades hídricas da vegetação, visando altos rendimentos de grãos, se faz necessário conhecer os parâmetros para a determinação da evapotranspiração da cultura (ET_c). A estimativa da ET_c é de fundamental importância, tanto para o manejo da irrigação, como para a escolha da época de semeadura em áreas de sequeiro, visando diminuir o efeito negativo causado por períodos de baixa disponibilidade hídrica. Além disso, para auxiliar nas decisões relacionadas ao manejo da água e aferir sua influência no rendimento, o modelo de produtividade de Stewart modificado (PAREDES et al., 2014a), utilizado em conjunto com a transpiração da cultura, calculada pelo modelo SIMDualKc (ROSA et al., 2012a; b), se configura em uma ferramenta de vital importância para o manejo da água em sistemas irrigados.

4.2. ESTIMATIVA DO REQUERIMENTO HÍDRICO DAS CULTURAS

A ET_c pode ser determinada por diferentes metodologias, como as que utilizam sensores de alto grau de segurança e confiabilidade (PAÇO et al., 2012). Dentre esses métodos vem se destacando os métodos de balanço de energia, que é baseado na Razão de Bowen (GAVILÁN; BERENGENA, 2007), ou das correlações turbulentas ou flutuações instantâneas (*Eddy Covariance*) (ZHANG et al., 2013; PAÇO et al., 2019). A medida mais acurada da ET_c é via lisímetros de pesagem (ALLEN et al., 2011a; b), entretanto, por se configurar em um sistema caro e não portátil (GAVILÁN; BERENGENA, 2007), seu uso é restrito a áreas de pesquisa. Outros métodos têm sido utilizados, como o do balanço hídrico (CAMEIRA et al., 2005), por microlisímetros para a avaliação da evaporação do solo (TODD et al., 2000), por medidores do fluxo de seiva (SIQUEIRA et al., 2014), cintilômetros e por técnicas de sensoriamento remoto (ALLEN et al., 2011a e b). Os métodos acima citados têm sido utilizados vastamente na pesquisa, apresentando resultados satisfatórios, no entanto, são métodos complexos, com dificuldades em se obter medições rotineiras, demandando altos custos e mão de obra especializada. Assim, os métodos diretos são usados para calibrar e ajustar as equações empíricas, combinando a evapotranspiração de referência FAO-PM com coeficientes culturais diários, nomeadamente os duais (ALLEN et al., 1998; 2005a, 2011; ALLEN e PEREIRA, 2009; ROSA et al., 2012a; b; MARTINS et al., 2013).

Geralmente, a ET_c é determinada através da evapotranspiração de referência (ET_o), multiplicado por um coeficiente de cultura simples (K_c), que representa as características da cultura (DOOREMBOS; PRUITT, 1977). Para a determinação da ET_o foram propostos modelos empíricos (PRIESTLEY; TAYLOR, 1972; TANNER; PELTON, 1960; MAKKINK, 1957; JENSEN; HAISE, 1963; HARGREAVES; SAMANI, 1985) e semi-analíticos (PENMAN, 1948), com a utilização de variáveis meteorológicas. Devido ao grande número de metodologias disponíveis na literatura, Allen et al. (1998) parametrizaram a equação FAO-56 Penman-Monteith para a determinação da ET_o . Nesta abordagem, a ET_o é um parâmetro climático que expressa a demanda evaporativa da atmosfera. A ET_o é estimada a partir de uma superfície de referência, sem restrição hídrica. A superfície de referência é uma cultura hipotética com características específicas, podendo ser grama (ALLEN et al., 1998) ou alfafa (ASCE, 2005). Os únicos fatores que afetam a ET_o são parâmetros meteorológicos, podendo ser calculado a partir desses dados, coletados em estações meteorológicas automáticas ou convencionais.

Muitos estudos têm analisado a performance dos diferentes métodos de calcular a ET_o , para diferentes localidades (ALLEN et al., 1989; DOOREMBOS; PRUITT, 1977) e, como resultado, a metodologia FAO-56 Penman-Monteith é recomendada como método padrão para definição e computação da ET_o , tendo alta probabilidade de estimativa correta, em uma ampla gama de locais e climas. Assim, a ET_c e a ET_o são relacionadas por meio do K_c e, em condições fora dos padrões, como a ocorrência de déficit hídrico, o K_c é ajustado pelo coeficiente de estresse, K_s (ALLEN et al., 1998). Como a ET_o representa aproximadamente todos os aspectos de clima, o K_c varia predominantemente em função das especificidades da cultura e, em menor grau, em função do clima, o que possibilita transferir valores e curvas de K_c para diferentes locais e climas (ALLEN et al., 2005a). Além disso, o K_c também pode ser calculado a partir das características da cultura, como a fração de cobertura do solo (f_c), índice de área foliar (IAF) e altura de plantas (h) (ALLEN; PEREIRA, 2009; PAÇO et al., 2019). Duas metodologias de cálculo de coeficientes de cultivo são encontradas na literatura: o K_c simples e o K_c dual, os quais serão descritos na seção 4.3.

4.3. COEFICIENTES DE CULTIVO

O K_c resulta da razão entre a ET_c e a ET_o , representando a integração entre os efeitos de quatro características que diferenciam a superfície de referência da cultura, sendo estas, a altura de plantas, o albedo (reflectância), a resistência do dossel, e a evaporação do solo (ALLEN et al., 1998; ALLEN; PEREIRA, 2009; ROSA et al., 2012a). Na metodologia do coeficiente de cultura simples, a diferença na evapotranspiração entre a cultura de referência e a superfície de referência é combinada em um único coeficiente. Esse coeficiente integra as diferenças de evaporação do solo e transpiração da cultura entre a cultura e a superfície de referência (ALLEN et al., 1998).

O cálculo da ET_c pela metodologia do K_c simples tem apresentado resultados satisfatórios, com apropriada acurácia (DOOREMBOS; PRUITT, 1977). No entanto, a combinação da transpiração e evaporação em um único coeficiente não permite estimar os impactos da frequência de irrigações/precipitações, ou o sistema de irrigação no total de água consumida (ROSA et al., 2012a). Assim, a adoção da metodologia do K_c dual possibilita a estimativa de forma separada da transpiração da cultura e da evaporação de água no solo (WRIGHT, 1982; ALLEN et al., 1998; 2005b; KOOL et al., 2014).

Na metodologia do K_c dual, o coeficiente de cultivo é particionado em dois fatores, que descrevem separadamente as diferenças de evaporação do solo e a transpiração entre a cultura e a superfície de referência. Assim, o coeficiente basal da cultura (K_{cb}) descreve a transpiração da planta, enquanto o coeficiente de evaporação (K_e) descreve a evaporação do solo da camada superficial, tendo $K_c = K_{cb} + K_e$ e $ET_c = (K_{cb} + K_e) * ET_o$ (ROSA et al., 2012a; ALLEN et al., 1998; 2005b).

A metodologia do K_c dual tem sido estudada em diferentes culturas e locais no mundo. A aplicação da metodologia busca determinar a demanda hídrica das culturas, particionando a evapotranspiração em transpiração da cultura e evaporação do solo, determinando os coeficientes de cultivo duais (K_e e K_{cb}). Dentre as aplicações da metodologia do K_c dual, pode-se citar os trabalhos de Wei et al. (2015), Giménez et al. (2017) e Payero e Irmak (2013) com a cultura da soja, no norte da China, Uruguai e Nebraska (Estados Unidos), respectivamente. Paredes et al. (2014a) em Portugal, Ding et al. (2013) no Norte da China, Martins et al. (2013) e Rodrigues et al. (2013) no sul do Brasil utilizaram a metodologia para a determinação da evapotranspiração da cultura do milho. Zhao et al. (2013) e Zhang et al. (2013) abordaram a estimativa da ET_c em uma rotação de trigo de inverno e milho no norte da China, enquanto Pereira et al. (2015a) aplicaram a metodologia para a cultura da cevada em Portugal. Os coeficientes de cultivo e a ET_c da cultura do tomate foram estudadas por Paredes et al. (2018a) na Itália, enquanto Paredes et al. (2018b) abordaram pastagens perenes como Tifton 85 no sul do Brasil. Culturas arbóreas como o pessegueiro foram estudadas no trabalho de Paço et al. (2012) e oliveiras por Poças et al. (2014) e Paço et al. (2014; 2019), para as condições de Portugal.

Na aplicação do método do K_c dual, observa-se cinco passos necessários, sendo eles: 1) Identificação da duração dos estádios de desenvolvimento das plantas e seleção dos valores de K_{cb} correspondentes; 2) Ajuste dos coeficientes K_{cb} de acordo com as condições climáticas durante os estádios; 3) Construção da curva de coeficiente basal, permitindo a determinação do K_{cb} em qualquer período durante o desenvolvimento da cultura; 4) Determinação diária dos valores de K_e para a evaporação da superfície; 5) Cálculo da ET_c como produto da ET_o e os coeficientes (K_{cb} e K_e) (ALLEN et al., 1998).

Com a disponibilidade de planilhas eletrônicas e softwares aplicados, a computação dos dados para a determinação dos parâmetros pode ser obtida de maneira prática. No entanto, um dos maiores desafios atuais da pesquisa é o de determinar os coeficientes de cultivo (K_c e K_{cb}) nos diferentes estádios da cultura, bem como da determinação da duração de cada estágio de

desenvolvimento das plantas. Allen et al. (1998) apresentam metodologias para transferências de valores de K_c e K_{cb} para diferentes regiões, enquanto Allen e Pereira (2009) e Paço et al. (2019) apresentam metodologias para a determinação dos valores de K_c e K_{cb} e respectiva duração dos principais estádios de desenvolvimento das plantas. No entanto, tais metodologias baseiam-se na determinação de variáveis morfológicas como o índice de área foliar (IAF), fração de cobertura do solo (f_c) e altura das plantas (h), sendo necessário medições periódicas dessas variáveis.

Dessa forma, os métodos de determinação dos coeficientes de cultura se restringem a aplicabilidade em pesquisa, razão pela qual se utiliza valores padrão para cultivos comerciais. A utilização de valores padrão, apesar de ser prática comum, pode acarretar em erros da estimativa do balanço hídrico, resultando em irrigações sub ou superestimadas. Como alternativa a essas metodologias, vários estudos (POÇAS et al., 2015a; CRUZ-BLANCO et al., 2014; PEREIRA et al., 2015b; ALLEN et al., 2007a; b; MATEOS et al.; 2013) têm apontado o potencial do uso de índices de vegetação derivados de sensoriamento remoto, seja ele para a estimativa dos coeficientes de cultivo, como também para a estimativa da ET_c .

4.4. ÍNDICES DE VEGETAÇÃO DERIVADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

O uso das ferramentas de sensoriamento remoto possibilita a obtenção de informações precisas de superfície e condições atmosféricas, permitindo a estimativa da demanda hídrica das culturas (CRUZ-BLANCO et al., 2014). Desde a publicação do FAO-56, muitos estudos têm sido realizados à fim de determinar a evapotranspiração a partir de sensoriamento remoto, destacando-se duas vertentes: 1) algoritmos de balanço de energia da superfície para determinação da evapotranspiração e; 2) determinação do coeficiente basal de cultivo (K_{cb}) a partir de índices de vegetação (PEREIRA et al., 2015b).

Entre os modelos de balanço de energia, pode-se citar o modelo METRIC (*Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration*), proposto por Allen et al. (2007a; b), o modelo TIM (*Trapezoid Interpolation Model*), que utiliza a temperatura radiométrica da superfície da terra para o ajuste do coeficiente de Priestley-Taylor para mapear a ET ajustada (JIANG; ISLAM, 2001) e o modelo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), proposto por Bastiaanssen et al. (1998). Além desses, o modelo TSEB (*Two Source Energy Balance*), o qual apresenta-se mais detalhado em relação às trocas de calor radioativa e

turbulentas do solo e da vegetação na interface solo-planta-atmosfera, proposto por Norman (1995), também pode ser utilizado.

Os modelos acima descritos têm apresentado resultados satisfatórios para a determinação da evapotranspiração em culturas anuais e arbóreas, no entanto, são modelos complexos que necessitam ser operados por usuários devidamente treinados, e com experiência nessa área. Outro contraponto diz respeito ao ambiente de estudo, pois são modelos que devem ser aplicados em áreas extensas e homogêneas, necessitando prévias calibrações com dados robustos. Dessa maneira, apresentam vasta utilização na pesquisa, mas com dificuldades de aplicações operacionais mais rotineiras (CHOI et al., 2009; ALLEN et al., 2011a; b; PEREIRA et al., 2015b). Em razão disso, a utilização de índices de vegetação derivados de imagens espectrais, sejam elas oriundas de satélites ou veículos aéreos não tripulados (VANTs), têm sido utilizados para a obtenção dos coeficientes de cultivo. Entre as principais vantagens do uso de técnicas de sensoriamento remoto estão a determinação da variação espacial dos valores reais de K_c e K_{cb} , dentro de uma área de cultivo (POÇAS et al., 2015a) e a variação entre diferentes áreas, devido a diferenças em datas de semeadura, espaçamento e cultivares (PEREIRA et al., 2015b). De acordo com Poças et al. (2015a), os índices de vegetação mais comumente utilizados para a determinação dos valores de K_c e K_{cb} são o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e o SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index).

Nessa linha de estudo, Mateos et al. (2013) avaliaram a aplicação da determinação da evapotranspiração atual ($ET_{c\ act}$) a partir de índices de vegetação combinados com a ET_o nas condições de Guadalquivir Valley, no sul da Espanha, em campos de cultivo irrigados e culturas arbóreas. Os autores encontraram resultados satisfatórios de ET_c , quando comparados com dados de Eddy Covariance, para culturas anuais (algodão e alho), e perenes (citrus e peras). No entanto, os resultados não foram satisfatórios para oliveiras, os quais, segundo os autores devem-se as características foliares das oliveiras. Para o trabalho, os autores utilizaram o índice de vegetação SAVI, pelo fato de o mesmo apresentar relação aproximadamente linear com a fração de cobertura do solo (f_c) e ser menos sensível à variabilidade de características do solo.

González-Dugo et al. (2013), aplicando a metodologia proposta por Mateos et al. (2013) na bacia de Guadalquivir Valley, obtiveram estimativas da $ET_{c\ act}$ das culturas para toda a região. Neste estudo, diferentes metodologias foram aplicadas para a identificação das culturas existentes ou em alguns casos a inexistência (pousio) e a determinação da $ET_{c\ act}$ foi conduzida a partir de índices de vegetação combinados com a ET_o . Entre as culturas avaliadas no estudo

estão culturas perenes (citros, oliveiras, videiras, álamo) e anuais (algodão, arroz, cereais de inverno, girassol, milho, tabaco e beterraba).

Poças et al. (2015a) propuseram uma nova metodologia para a estimativa do $K_{cb \text{ act}}$ baseado em índices de vegetação (VI), considerando o coeficiente de estresse (K_s) e o coeficiente de densidade (K_d), computado a partir da fração de cobertura do solo (f_c), sendo este último estimado por índices de vegetação. Assim, o coeficiente de cultivo (K_c) foi obtido de forma combinada, a partir do K_{cb} derivado de índices de vegetação e o K_e obtido pelo balanço hídrico diário do solo. Os autores testaram a metodologia em três culturas (milho, soja e oliveira), em três diferentes anos (2010, 2011 e 2012) no sul de Portugal. Os índices de vegetação utilizados pelos autores foram o SAVI e o NDVI, sendo que o SAVI se apresentou mais apropriado para culturas arbóreas (oliveira) e o NDVI para culturas anuais (milho e cevada). Os resultados encontrados foram considerados satisfatórios pelos autores, principalmente para a estimativa dos valores de K_{cb} e K_c (POÇAS et al., 2015a).

Os estudos de González-Dugo et al. (2013), Mateos et al. (2013) e Poças et al. (2015a) demonstram que a utilização de VI's de forma combinada com o balanço hídrico diário possibilita a obtenção de coeficientes de cultivo basal precisos. Além disso, as metodologias representam as condições atuais dos cultivos, possibilitando detectar a variabilidade da demanda hídrica dos cultivos, entre diferentes talhões e dentro de um mesmo talhão, aumentando a precisão das recomendações de irrigação.

Aplicabilidades no uso de índices de vegetação para o manejo da irrigação também podem ser observadas em videiras. O potencial de água na folha ao amanhecer (Ψ_{pd}) é um importante parâmetro para se determinar a demanda hídrica da cultura, dessa forma, Poças et al. (2015b) propuseram a utilização de dados espectrais das bandas do visível e do infravermelho para a estimativa de Ψ_{pd} utilizando relações empíricas. Diferentemente dos trabalhos anteriores, os autores obtiveram os dados de refletância do dossel com um espectralradiômetro portátil (Handheld 2, ASD Instruments, Boulder, CO, USA). Através dos índices de vegetação VARI (Visible Atmospherically Resistant Index) e NDGI (Normalized Difference Greenness Vegetation Index), os autores estimaram o Ψ_{pd} , sendo que, quando comparados com os dados de Ψ_{pd} medidos através de uma câmara de pressão (PMS 600, Albany, OR, USA), observaram coeficientes de determinação de 0,79 para ambos os índices de vegetação e coeficientes de regressão de 0,96 e 0,93 para os índices VARI e NDGI, respectivamente (POÇAS et al., 2015b).

Os resultados encontrados por Poças et al., 2015b demonstram a possibilidade da estimativa Ψ_{pd} com a utilização de sensores equipados com bandas na faixa do visível, uma vez

que, os índices VARI e NDGI são calculados a partir de dados nas bandas do azul, verde e vermelho (RGB). Dessa forma, o método mostra-se mais prático que medições convencionais de Ψ_{pd} , principalmente considerando-se a crescente disponibilidade e melhora na tecnologia desses sensores, incluindo a utilização de VANTs, sobretudo para culturas de alto valor agregado. Utilizando-se sensores como o espectroradiômetro para a determinação da demanda hídrica das culturas, Colaizzi et al. (2017) buscaram a determinação da evapotranspiração de culturas anuais (algodão, milho e sorgo) a partir de sensores infravermelho instalados a bordo de um pivô central. Ortega-Farías et al. (2016) buscaram estimar os componentes do balanço de energia em um pomar de oliveiras irrigado por gotejamento utilizando câmeras termais e espectrais instaladas em VANT.

Diante disso, verifica-se o grande potencial para o uso de dados oriundos de sensoriamento remoto para a determinação da demanda hídrica para diversas culturas e regiões. Uma das principais vantagens destes métodos diz respeito a capacidade de caracterizar as condições atuais dos cultivos, podendo-se calcular a demanda hídrica atual, bem como, caracterizar desenvolvimento real da cultura. Destaca-se, também, a relativa facilidade de se obter esses dados em áreas extensas, possibilitado a investigação da variabilidade espacial da cultura e sua resposta no suprimento hídrico.

4.5. FUNÇÕES EMPÍRICAS DE ÁGUA-PRODUÇÃO

As funções empíricas de água-produção são fundamentais para estimar possíveis impactos negativos da falta de chuvas no rendimento de grãos das culturas agrícolas, como também para o desenvolvimento do planejamento das irrigações em função das condições meteorológicas e da disponibilidade de água. De acordo com Paredes et al. (2014a), a estimativa do rendimento de grãos em função da disponibilidade hídrica têm sido estudada a partir de duas linhas de estudos: relacionando rendimento e evapotranspiração ou transpiração de forma empírica (JENSEN 1968; HANKS, 1974; STEWART et al., 1977; DOORENBOS; KASSAM, 1979), ou estimando o rendimento através de modelos de crescimento e produção de biomassa, como o CERES-Maize (DE JONGE et al., 2012), EPIC (CAVERO et al., 2000), e AquaCrop (HSIAO et al., 2009). Apesar de apresentarem alta acurácia, os modelos de crescimento demandam muitos dados e calibração de parâmetros, relativos principalmente às propriedades hidráulicas do solo, características das culturas e disponibilidade de nutrientes. Dessa forma,

uma alternativa, tem sido a adoção dos modelos empíricos de produtividade em função da água, em vez de modelos determinísticos (PAREDES et al., 2014a).

Entre os modelos empíricos, destaca-se o modelo de Stewart et al. (1977), o qual relaciona a evapotranspiração com a produtividade, levando-se em consideração um fator de resposta da cultura, tendo sido reportado inúmeras aplicações na literatura (DOORENBOS; KASSAM, 1979; Çakir, 2004; PAREDES et al., 2014a; PAREDES et al., 2017; WEI et al., 2015; GIMENEZ et al., 2017). Çakir (2004) utilizou o modelo de Stewart buscando avaliar a resposta no crescimento e produtividade do milho, submetido a déficit hídrico em diferentes estádios de desenvolvimento, buscando a diminuição da irrigação com o mínimo de redução no rendimento. Paredes et al. (2014a), utilizando o modelo modificado de Stewart, onde relacionaram a produtividade com a transpiração, avaliou a produtividade e o retorno econômico do milho submetido a diferentes estratégias de irrigação. Paredes et al. (2017), também utilizando o modelo modificado de Stewart, avaliaram a produtividade e o retorno econômico da cevada cervejeira, em função de diferentes datas de semeadura e irrigação suplementar, em clima temperado quente, na cidade de Alpiarça, Portugal. Wei et al. (2015), aplicaram o modelo de Stewart modificado, buscando avaliar a resposta da cultura da soja em resposta a disponibilidade hídrica, no Norte da China.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS DE CAMPO E OBSERVAÇÕES

O presente estudo foi composto de quatro etapas, sendo: (i) calibração e validação do modelo SIMDualKc; (ii) calibração e validação da estimativa da fração de cobertura (f_c) e do índice de área foliar (IAF) usando o NDVI; (iii) validação do SIMDualKc com f_c e IAF a partir do NDVI e; (iv) aplicação das fases S1 e S2 do modelo SIMDualKc-Stewart para a estimativa do rendimento de grãos das culturas de milho e soja no Rio Grande do Sul. As etapas i e ii consistiram de experimentos de campo, realizados em área irrigada e de sequeiro, no ano agrícola de 2018/19, na Depressão Central do RS (Tabela 1), com as culturas do milho (safra) e soja (safrinha). Na etapa iii utilizou-se áreas comerciais, monitoradas pelo Sistema Irriga®, um serviço de manejo e monitoramento de irrigação, desenvolvido pela UFSM e que atualmente monitora mais de 150 mil hectares por ano no Brasil. As áreas de estudo encontram-se localizadas nas principais regiões produtoras do Rio Grande do Sul, incluindo a Depressão Central, o Planalto Médio e as Missões, descritas na Tabela 1. Em cada propriedade utilizou-se uma área irrigada por pivô central e uma área de sequeiro, quando disponível. As áreas de sequeiro situavam-se adjacentes as áreas irrigadas (área de borda do pivô), com características de solo e relevo semelhantes, cultivadas com os mesmos híbridos e nas mesmas condições de manejo, de acordo com as recomendações técnicas e nível tecnológico de cada produtor. Na etapa (iv), para a aplicação das fases S1 e S2 do modelo de Stewart, utilizou-se todas as áreas das etapas i, ii e iii.

O manejo da irrigação das áreas (Tabela 1) foi realizado pelo Sistema Irriga®, serviço de manejo e monitoramento de irrigação, que utiliza um fator de depleção da água no solo de 0,40, ou seja, a irrigação é recomendada sempre que a disponibilidade de água no solo baixar 40% do total de água disponível (TAW). O sistema considera a profundidade do sistema radicular de forma crescente, variando de 0 a 0,70 m, sendo 0 no dia da semeadura e 0,70 quando a cultura atingir o máximo de crescimento. Tal fração de água disponível (40% TAW) será denominada RAW. A ET_c foi calculada a partir da ET_o e de coeficiente de K_c simples, ajustado ao sistema de cultivo, cultura e solo, conforme proposto por Allen et al (1998).

Tabela 1 - Informações gerais sobre as áreas cultivadas com soja e milho utilizadas para esse estudo, nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/2019, no Rio Grande do Sul.

Área	Local	Coordenadas		Altitude (m)	Área (ha)	Sequeiro	Ano Agrícola
		Latitude	Longitude				
SOJA							
1	Cachoeira do Sul	29°52'27"S	53°00'54"O	101	44	Sim	2018/19*
2	Cachoeira do Sul	30°18'14"S	52°58'30"O	108	154	Sim	2017/18
3	Catuípe	28°02'29"S	54°00'08"O	415	82	Sim	2017/18
4	São L. Gonzaga	28°21'17"S	54°47'27"O	292	110	Sim	2017/18
5	São L. Gonzaga	28°28'23"S	55°02'16"O	152	40	Não	2017/18*
6	Panambi	28°05'10"S	53°27'07"O	532	94	Sim	2018/19
7	São L. Gonzaga	28°28'23"S	55°02'16"O	152	40	Não	2018/19*
MILHO							
1	Cachoeira do Sul	29°52'27"S	53°00'54"O	101	44	Sim	2018/19
2	Panambi	28°05'34"S	53°27'35"O	494	67	Não	2017/18
3	São L. Gonzaga**	28°28'23"S	55°02'16"O	152	40	Não	2017/18
4	São L. Gonzaga	28°28'23"S	55°02'16"O	152	40	Sim	2018/19
5	Catuípe	28°02'29"S	54°00'08"O	415	82	Sim	2018/19

*áreas de safrinha. ** São Luis Gonzaga.

5.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DO SOLO

Na Tabela 2 são descritas as características físico-hídricas do solo das áreas de estudo, composto pelas variáveis densidade do solo (D_s), densidade de partícula (D_p), porosidade total (PT), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), umidade volumétrica de saturação (θ_{SAT}), umidade volumétrica da capacidade de campo (θ_{CC}), umidade volumétrica do ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e granulometria (areia, silte e argila).

Para a caracterização físico-hídrica do solo da área 1, foi realizada a coleta de amostras indeformadas e deformadas de solo nas camadas de 0,00 - 0,20, 0,20 - 0,40, e 0,40 - 0,70 m de profundidade. Para as demais áreas, os dados da caracterização físico-hídrica do solo foram acessados do banco de dados do Sistema Irriga®. As amostragens e as análises foram realizadas no laboratório de análises físicas do Sistema Irriga, pertencente ao Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria.

A D_s foi determinada dividindo-se a massa de solo seco pelo volume do anel. A D_p foi determinada pelo método do balão volumétrico, modificado por Gubiani, Reinert e Reichert (2006), baseado no princípio da determinação do volume de álcool necessário para completar a capacidade de um balão de volume conhecido, contendo solo macerado e seco em estufa.

Os pontos da curva de retenção de água no solo foram determinados de acordo com a metodologia descrita por Teixeira et al. (2017). Desta forma, as amostras indeformadas foram

saturadas e inicialmente submetidas às tensões de 1, 6 e 10 kPa na mesa de areia para drenagem da água retida nos poros relativos a estes potenciais. Posteriormente, aplicou-se tensões de 33 e 100 kPa, no aparelho extrator de Richards, até as amostras atingirem o equilíbrio em cada uma das tensões. As massas das amostras foram determinadas após cada pressão utilizada e, após a tensão de 100 kPa, colocadas a secar em estufa à temperatura de 105°C, até massa constante. Os pontos da curva referentes às tensões de 500 e 1500 kPa foram estimados através da aplicação de funções de pedotransferência, descritas por Michelin et al. (2010). A θ_{CC} e o θ_{PMP} foram as umidades determinadas nas tensões de 10 kPa e 1500 kPa, respectivamente, para todas as áreas.

As frações de argila, silte e areia foram determinadas pelo método do densímetro, o qual baseia-se na sedimentação das partículas que compõem o solo. Dessa forma, adicionou-se um dispersante químico, fixando-se um tempo único para a determinação da densidade da suspensão a qual estima-se como a concentração total de argila. As frações grosseiras (areias fina e grossa) são separadas por tamisação e determinadas por pesagem, enquanto o silte foi obtido por diferença (TEIXEIRA et al., 2017).

Tabela 2 - Caracterização físico-hídrico dos solos das áreas que compõem o estudo, cultivadas com soja e milho, nos anos agrícolas de 2017/18 e 2018/2019, no Rio Grande do Sul.

Camada (m)	D _s (Mg m ⁻³)	D _p	Porosidade			θ _{SAT}	θ _{CC} (cm ³ cm ⁻³)	θ _{PMP}	Granulometria		
			PT	Macro (%)	Micro				Areia	Silte (g Kg ⁻¹)	Argila
Área soja 1 e milho 1											
0,00 - 0,20	1,40	2,50	44	13	31	0,436	0,309	0,098	572	321	107
0,20 - 0,40	1,38	2,55	45	12	33	0,439	0,334	0,119	475	395	130
0,40 - 0,70	1,43	2,57	44	9	35	0,437	0,347	0,138	428	417	155
Área soja 2											
0,00 - 0,20	1,64	2,55	36	8	28	0,364	0,264	0,121	481	271	248
0,20 - 0,40	1,53	2,56	40	11	29	0,386	0,272	0,140	445	287	268
0,40 - 0,70	1,49	2,58	42	12	30	0,392	0,274	0,150	410	275	315
Área milho 2											
0,00 - 0,20	1,33	2,74	51	12	39	0,534	0,373	0,232	229	225	546
0,20 - 0,40	1,26	2,76	54	13	41	0,574	0,393	0,226	201	230	569
0,40 - 0,70	1,34	2,75	51	7	44	0,513	0,419	0,273	189	262	549
Área soja 3 e milho 5											
0,00 - 0,20	1,30	2,81	55	8	47	0,549	0,474	0,360	39	283	678
0,20 - 0,40	1,26	2,78	55	11	44	0,554	0,442	0,330	37	315	648
0,40 - 0,70	1,32	2,76	52	7	45	0,536	0,470	0,380	36	286	678
Área soja 4											
0,00 - 0,20	1,56	2,79	44	3	41	0,475	0,374	0,260	91	388	521
0,20 - 0,40	1,47	2,88	48	3	45	0,498	0,398	0,270	63	366	571
0,40 - 0,70	1,38	2,91	54	6	46	0,523	0,401	0,300	53	369	578
Áreas soja 5 e 7 e milho 3 e 4											
0,00 - 0,20	1,42	2,81	49	5	44	0,528	0,393	0,240	78	375	547
0,20 - 0,40	1,29	2,82	54	11	43	0,525	0,382	0,230	65	343	592
0,40 - 0,70	1,44	2,82	49	7	42	0,487	0,374	0,290	53	350	597
Área soja 6											
0,00 - 0,20	1,39	2,68	48	6	42	0,515	0,436	0,250	237	248	514
0,20 - 0,40	1,22	2,66	54	12	42	0,542	0,418	0,220	173	298	529
0,40 - 0,70	1,14	2,68	57	13	44	0,566	0,419	0,210	149	304	548

D_s: Densidade do solo; D_p: Densidade de Partícula; PT: Porosidade Total; Macro: Macroporosidade; Micro: Microporosidade; θ_{SAT}: Umidade volumétrica de saturação; θ_{CC}: Umidade volumétrica da capacidade de campo (10kPa); θ_{PMP}: Umidade volumétrica do Ponto de murcha permanente (1500 kPa).

5.3. BASE DE OBSERVAÇÕES DE CAMPO

As observações da planta, do solo e da irrigação, necessárias para a calibração dos modelos, foram realizadas segundo recomendações de Pereira et al (2015). A área 1 foi escolhida como base de observações de campo. As observações foram feitas em três parcelas previamente demarcadas, de 6x6 m, dentro das áreas de estudo. As demais áreas foram usadas para os diferentes cenários de simulação e validação dos modelos, conforme metodologia apresentada por Paredes et al. (2017). Dessa forma, os seguintes dados foram coletados nas observações:

- a) Dados da cultura, incluindo datas de semeadura e colheita, cultivares/híbridos, população, espaçamento e ocupação anterior de cada área para todas as áreas de estudo (Tabela 3);

Tabela 3 - Informações sobre as culturas da soja e do milho (data de semeadura e colheita, cultivares/híbridos, espaçamento entre linhas de cultivo e cultura antecessora) para os diferentes locais de estudo, nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/2019, no Rio Grande do Sul.

Áreas	Data de Semeadura	Data de Colheita	Cultivar/ Híbrido	Pop. (pl. ha ⁻¹)	Esp. (m)	Cultura antecessora
SOJA						
1	24/01/2019	17/05/2019	TMG 7062	444 000	0,45	Milho
2	17/10/2017	19/03/2018	BMX RAI0	320 000	0,50	Aveia
3	22/11/2017	20/03/2018	BMX ATIVA	377 000	0,45	Aveia
4	01/11/2017	17/03/2018	SYN 1159 IPRO	240 000	0,50	Aveia
5	11/01/2018	27/04/2018	TMG 7062	330 000	0,45	Milho
6	22/11/2018	01/04/2019	NS 5445 IPRO	260 000	0,45	Aveia
7	31/01/2019	15/05/2019	BMX GARRA	430 000	0,45	Milho
MILHO						
1	05/08/2018	14/01/2019	BG 7318 YH	78 000	0,45	Aveia
2	30/11/2017	06/04/2018	30F53VYH	62 000	0,45	Pousio
3	16/08/2017	30/12/2017	DKB 230	82 000	0,45	Aveia
4	12/08/2018	28/01/2019	BG 7318 YH	82 000	0,45	Aveia
5	08/11/2018	14/03/2019	SYN 422 VIP3	70 000	0,45	Aveia

Para a área 1 coletou-se informações morfológicas, em intervalos aproximados de 7 dias, em duas plantas previamente demarcadas, em cada parcela, incluindo a altura de plantas (h) e os principais estádios fenológicos, a f_c para a soja e o IAF para o milho. Os resultados obtidos para essas variáveis morfológicas são apresentados na Tabela 4 para a soja e Tabela 5 para o milho.

Tabela 4 - Altura da cultura (h) e fração de cobertura (f_c) em soja irrigada e de sequeiro, na Área 1, na safra de 2018/19.

Datas	Irigado			Sequeiro		
	f _c	h	Fenologia	f _c	h	Fenologia
12/02/2019	0,10	0,07	V3	0,12	0,09	V4
19/02/2019	0,17	0,11	V5	0,15	0,12	V5
28/02/2019	0,33	0,18	V8	0,46	0,21	V8
04/03/2019	0,45	0,22	V10	0,57	0,27	V9
13/03/2019	0,84	0,43	V12/R1	0,82	0,49	V12/R1
23/03/2019	0,98	0,55	V14/R3	0,97	0,62	V14/R3
27/03/2019	-	0,64	V15/R3	-	0,68	V15/R3
03/04/2019	-	0,72	V17/R4	-	0,78	V16/R4
10/04/2019	-	0,74	V17/R4	-	0,78	V17/R4
17/04/2019	-	0,74	V18/R5	-	0,78	V18/R5
24/04/2019	-	0,79	V20/R6	-	0,82	V18/R6
01/05/2019	-	0,79	V20/R6	-	0,82	V18/R6
08/05/2019	-	0,79	V20/R7	-	0,82	V20/R7

Tabela 5 - Índice de área foliar (IAF), altura de plantas (m) e fenologia do milho cultivado na área 1, irrigado e sequeiro, no ano agrícola de 2018/19, no Rio Grande do Sul.

Datas	Irigado			Sequeiro		
	IAF	h	Fenologia	IAF	h	Fenologia
05/09/2018	0,02	0,03	V2	0,02	0,03	V2
12/09/2018	0,02	0,05	V3	0,05	0,05	V4
19/09/2018	0,09	0,08	V4	0,10	0,07	V4
26/09/2018	0,32	0,16	V6	0,26	0,14	V6
03/10/2018	1,34	0,26	V8	1,15	0,22	V7
10/10/2018	1,74	0,38	V9	1,36	0,33	V8
18/10/2018	3,26	0,73	V10	3,31	0,50	V9
30/10/2018	5,46	1,46	V15	4,87	1,27	V13
13/11/2018	6,09	2,32	V18 R1	6,00	2,25	V17
21/11/2018	6,08	2,32	R2	5,97	2,25	V19 R1
28/11/2018	6,04	2,32	R3	5,88	2,25	R2
04/12/2018	6,00	2,32	R4	5,83	2,25	R4
10/12/2018	5,98	2,32	R4	5,76	2,25	R4
03/01/2019	--	--	R6	--	--	R6

Os estádios de desenvolvimento foram determinados conforme a escala fenológica de Fehr e Caviness (1977) para a soja e Ritchie, Hanway e Benson (1993) para o milho. A altura de plantas foi mensurada da superfície do solo até o último nó completamente desenvolvido da planta, e até a última folha completamente expandida, respectivamente, para a soja e o milho. A f_c foi utilizada para a soja, sendo determinada a partir de fotografias de duas linhas em três

diferentes pontos, próximos aos sensores de umidade do solo, adicionando uma marcação no solo de 0,20 m, a qual servia como escala. A partir dessa escala, calculou-se a área total da imagem e, por diferença de cor espectral, a área correspondente ao dossel da cultura e a superfície do solo, utilizando o software ImageJ® (National Institute of Health, EUA). Dividindo-se a área correspondente ao dossel da cultura pela área total da imagem, determinou-se a f_c . No caso do milho, utilizou-se o IAF, o qual foi determinado de forma não destrutiva, medindo-se a maior largura e o maior comprimento das folhas completamente desenvolvidas e estimando-se a área de cada folha individual, conforme metodologia descrita por Stickler, Wearden e Pauli (1961).

- b) A profundidade do sistema radicular (Z_r , m) foi determinada visualmente, através da abertura de trincheiras (uma no irrigado e uma no sequeiro) entre duas linhas de plantas, até a profundidade de 1,00 m, quando as culturas se encontravam em estágio de desenvolvimento R2, onde se constatou que a maior parte do sistema radicular se concentrava na camada superficial. Não se visualizou raízes abaixo de 0,60 metros para a soja e 0,80 metros para o milho. Considerando as respectivas profundidades do sistema radicular para soja e milho e a caracterização físico-hídrica dos solos apresentada na Tabela 3, apresenta-se na Tabela 6 a TAW e RAW para todas as áreas de cultivo, utilizadas no modelo SIMDualKc.

Tabela 6: Total de água disponível (TAW) e total de água facilmente disponível (RAW) para os cultivos de soja e milho, nos anos agrícolas de 2017/18 e 2018/19, no Rio Grande do Sul.

Área	TAW (mm)	RAW (mm)
SOJA		
1	126	50
2	80	32
3	63	25
4	69	27
5 e 7	78	31
6	119	48
MILHO		
1	169	68
2	122	48
3 e 4	101	40
5	81	32

- c) As datas e lâminas de irrigações aplicadas foram fornecidas pelo Sistema Irriga® e são apresentadas no Anexo 1 e Anexo 2 para a soja e Anexo 3 para o milho.
- d) O rendimento de grãos na área 1 foi determinado a partir de uma área útil composta de 3 linhas centrais de cada parcela, de 2 m de comprimento. Determinou-se o rendimento de grãos (Mg ha^{-1}) através da debulha manual e pesagem com ajuste do peso a 13% de umidade. Para as áreas de validação, os dados de rendimento de grãos foram disponibilizados pelo Sistema Irriga®.
- e) Na área 1, o conteúdo de água no solo (θ , $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) foi mensurado através de sensores FDR, modelo CS 616, ligados a um datalogger CR 10X (todos da Campbell Scientific, Logan, EUA), nas profundidades de 0,00 - 0,30 e 0,30 - 0,60 m, em intervalos de aproximadamente 7 dias. A água disponível no solo (ASW, mm), armazenada na profundidade do sistema radicular das plantas (Z_r), foi integrada pela média do θ das camadas, subtraído da média ponderada do θ_{PMP} , conforme a equação: $\text{ASW} = 1000(\theta - \theta_{\text{PMP}}) * Z_r$.
- f) Nas demais áreas (validação), o conteúdo de água no solo foi medido por meio de estações de campo do Sistema Irriga®, compostas por sensores de resistência elétrica, tipo Watermark, modelo 200SS (Irrometer, CA, USA), um pluviômetro de balança conectados a um sistema de armazenamento e transmissão de dados. Os sensores foram instalados a 0,10 m e 0,40 m de profundidade, sendo realizadas leituras automáticas diárias do potencial de água no solo. Os dados eram enviados para o banco de dados do Sistema Irriga® através da rede de Serviços Gerais de Pacote por Rádio (GPRS). Os dados foram transformados em conteúdo volumétrico de água no solo (θ), diariamente, para cada profundidade, conforme a metodologia de Van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^m} \quad \text{Eq. 1}$$

onde: θ , θ_s e θ_r são o conteúdo atual de água no solo, o conteúdo de água na umidade de saturação e o conteúdo de água residual no solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), respectivamente; α , m e n por sua vez são os parâmetros da curva de retenção de água no solo, determinados

para cada profundidade de medida e Ψ o potencial de água no solo (kPa), medido pelo sensor, sendo considerada a última informação recebida para cada dia. Os parâmetros da curva de retenção de água no solo foram determinados com auxílio do software SWRC, versão 2.00 (DOURADO-NETO et al., 2000).

- g) Além dos dados do conteúdo de água no solo observados pelo Sistema Irriga®, informações da altura de plantas, profundidade do sistema radicular e fenologia também foram observados em intervalos de ± 20 dias.

5.4. DADOS METEOROLÓGICOS DIÁRIOS

O conjunto de dados meteorológicos utilizados no presente estudo foi composto pela temperatura máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa máxima e mínima (%), velocidade do vento (m s^{-1}), radiação global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e precipitação (mm). Estes dados, com exceção da precipitação, foram coletados das estações meteorológicas automáticas pertencentes à rede de estações meteorológicas do Sistema Irriga® (CARLESSO; PETRY; TROIS, 2009) e ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As estações utilizadas estavam localizadas a ± 30 km das áreas monitoradas. A precipitação foi obtida de um pluviômetro convencional, de 20 cm de diâmetro de borda, instalado na periferia da área 1. Nas demais áreas, a precipitação foi coletada por pluviômetros de balança, acoplados às estações de campo.

5.5. MODELAÇÃO: APLICAÇÃO DO MODELO SIMDualKc

O modelo SIMDualKc calcula o balanço hídrico diário para um perfil de solo, contabilizando todas as entradas e saídas, bem como a variação no armazenamento, conforme descrito na Eq.2.

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad \text{Eq. 2}$$

em que, $D_{r,i}$ e $D_{r,i-1}$, correspondem a depleção de água (mm) na zona radicular, no dia i e dia $i-1$, respectivamente. P_i é a precipitação, RO_i , o escoamento superficial, I_i a irrigação, CR_i a ascensão capilar, $ET_{c,i}$ a evapotranspiração da cultura, e DP_i a percolação profunda, referentes

ao dia i , em mm. Para o presente o estudo, por se tratar de solos profundos, o componente CR_i não foi considerado.

O modelo determina o balanço hídrico com base no TAW (mm), que é igual a lâmina de água armazenada entre o θ_{CC} e o θ_{PMP} (Tabela 2 e Tabela 3) na zona radicular (Z_r) da cultura. A água facilmente disponível (RAW), fração de água que pode ser esgotada sem causar estresse às plantas, é calculada a partir da calibração do fator de depleção (p). A ET_c é computada através da metodologia $K_c * ET_o$, dividindo-se o K_c na componente evaporação (K_e) e transpiração (K_{cb}), considerando o fator de estresse (K_s), quando da lâmina armazenada apresentar-se abaixo da RAW.

Os valores de K_{cb} necessitam de calibração prévia; dessa forma, utilizou-se como valores iniciais os encontrados por Giménez et al. (2017) para a soja e Martins et al. (2013) para o milho. Posteriormente seguiu-se a metodologia de tentativa e erro conforme apresentado na literatura (ROSA et al., 2012 a e b; GIMÉNEZ et al., 2017; PAREDES et al., 2018a; PAREDES et al., 2018b; PEREIRA et al., 2015a) para otimizar este parâmetro. O coeficiente de estresse K_s é computado pelo modelo, usando um balanço hídrico diário para toda a zona radicular, conforme descreve Rosa et al. (2012 a e b).

Para a obtenção do coeficiente de evaporação (K_e) seguiu-se os procedimentos descritos por Allen et al. (1998) e Allen et al. (2005b), que considera a água disponível na camada evaporável do solo. Para tanto, o total de água evaporável (TEW) e o total de água facilmente evaporável (REW) são computados de acordo com a granulometria (areia grossa, areia fina, silte e argila) na camada evaporável do solo. A espessura da camada evaporável (Z_e), varia de 0,10 m para solos arenosos e 0,15 m para solos argilosos (ALLEN et al., 1998; ALLEN et al., 2005b).

A percolação profunda (DP) é computada pelo modelo usando a função paramétrica proposta por Liu, Pereira e Fernando (2006), a qual é uma função decrescente ao longo do tempo e relaciona o conteúdo de água na saturação, depois de uma chuva pesada ou irrigação, com o tempo de drenagem até que a θ_{CC} seja atingida. Os parâmetros da função (a_D e b_D) foram otimizados durante a calibração. O a_D corresponde a um valor de retenção de água entre a θ_{CC} e a θ_{SAT} , em lâmina (mm) para um perfil de solo de 1 metro de profundidade, enquanto o b_D simula a velocidade em que a água é drenada para fora da zona radicular da cultura, sendo que o valor médio é de -0,0173. Valores maiores que -0,0173 indicam uma drenagem mais lenta e valores menores que -0,0173 indicam uma drenagem mais rápida (LIU; PEREIRA; FERNANDO, 2006). O escoamento superficial (RO) foi estimado utilizando o procedimento

da curva número (CN), conforme metodologia descrita por Allen et al. (2007). Para fins de calibração dos parâmetros a_D e b_D e CN, aplicou-se inicialmente os valores calibrados por Paredes et al. (2018b).

Assim, os dados de entrada utilizados no modelo SIMDualKc foram: (i) dados meteorológicos diários referentes à precipitação (mm), umidade relativa mínima do ar (%), velocidade do vento ($m s^{-1}$) e ET_o ($mm dia^{-1}$); (ii) dados de solo para o cálculo da TAW e RAW, bem como TEW, REW, Z_e e *mulch* (Tabela 2 e Tabela 3); (iii) dados agronômicos observados sobre as datas de início dos estádios de crescimento das culturas, Z_r (m), h (m) e IAF ao longo do ciclo das culturas e dados não observados ou *standard*, como: K_{cb} e p e, portanto, objeto de calibração; (v) dados para a estimativa da DP, os quais requerem calibração, como descrito por Liu, Pereira e Fernando (2006); (vi) dados para a estimativa da CN, conforme descrito por Allen et al. (2007); (vi) dados das irrigações referentes à lâmina líquida aplicada (mm), sistema de irrigação e datas das irrigações (Anexo 1, Anexo 2 e Anexo 3).

5.6. ESTIMATIVA DA f_c E DO IAF ATRAVÉS DE NDVI

Paras as áreas de validação dos cultivos da soja (2, 3, 4, 5, 6 e 7) e do milho (2, 3, 4, 5) para as quais não havia dados morfológicos observados, buscou-se estimar a f_c para a soja e o IAF para o milho utilizando-se do NDVI, derivado de imagens de satélite. As imagens em âmbito espacial foram obtidas pelo satélite Sentinel (sensores 2A e 2B). Ambos os sensores foram utilizados de forma complementar, com a intercalação das visitas, para cobrir a maior frequência temporal possível, para evitar cobertura de nuvens.

Para o cálculo do NDVI (Eq. 3) utilizou-se as bandas do vermelho e do infravermelho próximo com resolução de 10 m. Os cálculos para a obtenção do NDVI foram processados na biblioteca open-source do Google Earth Engine (GORELICK et al., 2017) (<https://earthengine.google.com/>).

$$NDVI = \frac{(Nir - Red)}{(Nir + Red)} \quad \text{Eq. 3}$$

em que Nir e Red são os valores de refletância da superfície nas bandas do infravermelho próximo e vermelho, respectivamente. Todas as imagens que apresentavam alguma cobertura de nuvens foram descartadas, sendo consideradas apenas as imagens apresentadas nos Anexo

4 e Anexo 5 para a soja e Anexo 6 e Anexo 7 para o milho. Ao todo foram utilizadas 131 imagens, sendo 77 para a soja e 54 para o milho. A área 7 da soja teve o menor número de imagens (6), enquanto a área 6 da soja teve 20 imagens disponíveis. Para o milho, o menor número de imagens obtida foi para a área 5 (8), e o maior número na área 2, com 14 imagens.

Para a soja, estimou-se a f_c seguindo o procedimento descrito por Poças et al. (2015a), descrita pela Eq. 4.

$$f_{c\ VI} = \beta_1 \left(\frac{NDVI_i - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right) + \beta_2 \quad \text{Eq. 4}$$

onde, β_1 é um coeficiente empírico (0 a 1), o qual depende do valor máximo do NDVI em cada estágio de desenvolvimento da cultura; $NDVI_i$ corresponde ao NDVI para uma data específica, e $NDVI_{\max}$ e $NDVI_{\min}$ são os NDVIs para o máximo e mínimo de cobertura vegetal, respectivamente; β_2 corresponde a um coeficiente de ajustamento associado com a senescência da cultura e amarelecimento das folhas. O NDVI não é sensível à senescência das folhas, resultando em valores menores no final do ciclo da cultura, assim, β_2 compensa a diminuição do índice de vegetação em função da senescência, que depende da f_c (POÇAS et al., 2015a). Os valores dos parâmetros β_1 , β_2 , $NDVI_{\max}$ e $NDVI_{\min}$ calibrados para o presente estudo são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros para a estimativa da fração de cobertura (f_c) utilizando índice NDVI, nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/2019, no Rio Grande do Sul.

Parâmetros	Áreas						
	1	2	3	4	5	6	7
$NDVI_{\max}$	0,75	0,70	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
$NDVI_{\min}$	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
β_2	0	0	0 - 0,5	0	0	0,3	0
$\beta_{1\ ini}$	0,1 - 0,2	0,1 - 0,2	0,15 - 0,25	0,15 - 0,25	0,25	0,3	0,10
$\beta_{1\ dev}$	0,3 - 0,6	0,3 - 1,0	0,3	0,3	0,3 - 0,7	0,3 - 0,6	0,5
$\beta_{1\ mid}$	0,8 - 1,0	1	1	1	1	0,7 - 1	1
$\beta_{1\ end}$	-	1	1	1	1	1	1

$\beta_{1\ ini}$, $\beta_{1\ dev}$, $\beta_{1\ mid}$ e $\beta_{1\ end}$ correspondem respectivamente, aos estádios inicial, crescimento, médio e final. Os valores de β_2 igual a zero, correspondem a uma data próxima à maturidade fisiológica, enquanto valores próximos de 0,5 correspondem a datas próximas à colheita.

Para fins de calibração e validação do procedimento descrito por POÇAS et al. (2015a) utilizou-se os dados coletados na Área 1; dessa forma, a Área 1 irrigada foi utilizada para calibração dos parâmetros e a Área 1 sequeiro para a validação.

Para o milho, o IAF foi estimado através de regressão linear, relacionando-se dos dados de IAF observados com os valores de NDVI da área 1 irrigada, sendo esta regressão validada com os dados da área 1 de sequeiro.

Os dados de f_{cNDVI} estimados por esta metodologia foram posteriormente utilizados nas áreas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 de soja, enquanto o IAF_{NDVI} foi utilizado nas áreas 2, 3, 4 e 5 de milho, de forma a parametrizar o modelo SIMDualKc. Sendo assim, o K_{cb} e K_c apresentados para estas áreas são processados pelo SIMDualKc de forma combinada com a f_{cNDVI} e IAF_{NDVI} . Os valores de NDVI para todas as áreas da soja, bem como as f_{cNDVI} e IAF_{NDVI} são apresentadas nos Anexo 4 e Anexo 5 para a soja e Anexo 6 e Anexo 7 para o milho. A opção da f_c para a soja e do IAF para o milho se dá pela quantidade de dados amostrais. Na soja, os dados de f_c foram coletados em um maior intervalo de tempo, enquanto que, para o milho, devido à altura da planta, as medições de f_c ficaram limitadas ao início do desenvolvimento da cultura, sendo o IAF do milho mensurado durante todo o ciclo.

5.7. FUNÇÕES EMPÍRICAS DE ÁGUA-PRODUÇÃO

Para a simulação do rendimento do milho em função da disponibilidade hídrica, aplicou-se o modelo SIMDualKc, em combinação com o modelo de Stewart (STEWART et al., 1977), nas fases S1 (a) e S2, e modificados por Paredes et al. (2014a). O modelo S1 assume uma dependência linear entre o rendimento e a transpiração da cultura, considerando um coeficiente de proporcionalidade (K_y) como fator de resposta de produtividade (Eq. 5):

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = K_y \left(1 - \frac{T_{c \text{ act}}}{T_c} \right) \quad \text{Eq. 5}$$

onde Y_a e Y_m são, respectivamente, o rendimento atual e máximo ($Mg \text{ ha}^{-1}$); $T_{c \text{ act}}$ e T_c , são, respectivamente, transpiração atual e potencial da cultura (mm); e K_y é o fator de resposta do rendimento da cultura em função da transpiração. Dessa forma, o rendimento pode ser estimado conforme a Eq. 6.

$$Y_a = Y_m - \frac{Y_m K_y T_d}{T_c} \quad \text{Eq. 6}$$

em que T_d é o déficit transpiratório (mm), ou seja, a diferença entre a transpiração atual e potencial da cultura. O K_y foi ajustado pelo método de tentativa e erro a fim de se obter um K_y que resultasse nos menores erros entre os rendimentos observados e estimados pelo modelo, considerando todas as áreas

O modelo S2 considera o estágio e/ou fase em que o déficit hídrico ocorreu, sendo descrito por Stewart et al. (1977) e apresentado na Eq. 7.

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = \frac{\sum_i [K_{y,i} (ET_{c,i} - ET_{c,act,i})]}{ET_c} \quad \text{Eq. 7}$$

em que $ET_{c,i}$ e $ET_{c,act,i}$ (mm) são a ET máxima e atual relativa a cada estágio da cultura i , e $K_{y,i}$ é o fator de resposta da cultura para o estágio i . No presente estudo, a estimativa do Y_a pelo modelo S2 segue o descrito por Paredes et al. (2014a), apresentado na Eq. 8.

$$Y_a = Y_m - \frac{Y_m (\beta_v T_{d,v} + \beta_f T_{d,f} + \beta_m T_{d,m})}{T_c} \quad \text{Eq. 8}$$

sendo, β_v , β_f , e β_m os fatores de resposta ao rendimento (adimensionais) para os estádios vegetativo, floração e maturação, T_c a transpiração total e $T_{d,v}$, $T_{d,f}$ e $T_{d,m}$ são os déficits de transpiração para os mesmo estádios (mm). Para a presente análise, adotou-se como estágio vegetativo o período entre a semeadura e o início do período intermediário, a floração correspondeu ao período intermediário e a maturação fisiológica correspondeu ao estágio final. Assim, os valores de β_v , β_f , e β_m foram ajustados pelo método de tentativa e erro a fim de se obter os menores erros entre os rendimentos observados e estimados pelo modelo.

Tanto para o modelo S1, como para o modelo S2, considerou-se como Y_m o rendimento do cultivo irrigado de cada área, e aplicou-se o modelo para a estimativa do rendimento de sequeiro (Y_a). Dessa forma, T_c resultou da transpiração dos cultivos irrigados, enquanto $T_{c,act}$ é a transpiração dos cultivos de sequeiro. Para a soja, a exceção ocorreu para às áreas 5 e 7, as quais não possuem área de sequeiro; no entanto, por serem as mesmas áreas, com semeadura e colheita em épocas próximas, considerou-se a Área 5 como Y_m para a estimativa do rendimento da Área 7, sendo T_c a transpiração da Área 5 e $T_{c,act}$ a transpiração da Área 7. Para o milho, não

se aplicou os modelos de rendimento para os locais onde não havia área de sequeiro (áreas 2 e 3).

5.8. INDICADORES ESTATÍSTICOS

Um conjunto de indicadores estatísticos foi utilizado para a avaliação dos resultados, sendo estes: coeficiente linear de regressão (b_0), coeficiente de determinação (R^2), raiz quadrada do quadrado médio do erro (RMSE) e porcentagem de viés (*P-bias*). O b_0 foi obtida através de regressão linear forçada à origem e utilizado para verificar a sub ou superestimação dos dados pelo modelo. O R^2 indica a correlação existente entre os dados observados e estimados, enquanto o RMSE é o erro propriamente dito, o qual objetiva um valor mais próximo de zero (MORIASI et al., 2007). O *P-bias* mede se a tendência média dos dados simulados é maior ou menor do que os valores observados (GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1999). O valor ideal do PBIAS é 0, ou seja, valores de baixa magnitude indicam que a simulação de modelo foi precisa, enquanto que, valores positivos indicam tendência de superestimação do modelo e valores negativos de subestimação do modelo.

As análises estatísticas foram aplicadas sempre da necessidade da calibração/validação dos modelos estudados. Desta forma, quatro calibrações/validações foram realizadas, sendo: i) a calibração e validação do modelo SIMDualKc utilizando a base de observação de dados de campo da área 1; ii) a calibração e validação da metodologia de estimativa da f_c e do IAF utilizando NDVI; iii) calibração e validação do modelo SIMDualKc utilizando f_c NDVI e IAF_{NDVI}; e iv) estimativa dos coeficientes de resposta ao rendimento (K_y , β_v , β_f , e β_m). Para i e iii os dados comparados foram de água disponível observada (ASW_{obs}) e de água disponível simulada (ASW_{sim}), para ii, os dados comparados foram referentes aos dados de f_c e IAF observados e estimados por NDVI e para iv, comparou-se os dados observados de rendimento, com os dados simulados de rendimento pelos modelos S1 e S2.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS

Nas Figura 1 e Figura 2 é apresentada a variação dos dados meteorológicos diários observados durante os cultivos de soja, nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/19, respectivamente. O conjunto de dados apresentados é constituído pela temperatura máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$), precipitações (mm), radiação global incidente (R_s) e evapotranspiração de referência (ET_0).

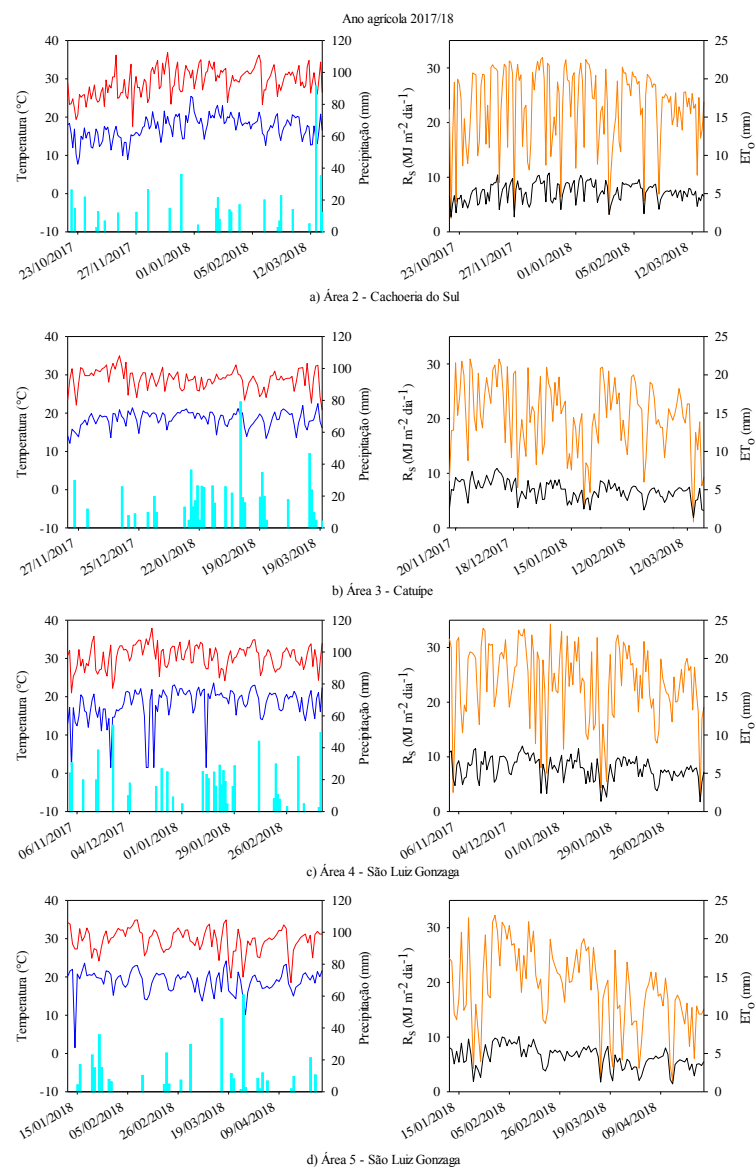


Figura 1 - Temperatura máxima (—, $^{\circ}\text{C}$) e mínima (—, $^{\circ}\text{C}$) do ar, precipitações (—, mm), R_s (—, $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e ET_0 (—, mm) para as áreas 2 - Cachoeira do Sul (a), 3 - Catuípe (b), 4 - São Luiz Gonzaga (c) e 5 - São Luiz Gonzaga (d) no ano agrícola de 2017/18, no Rio Grande do Sul.

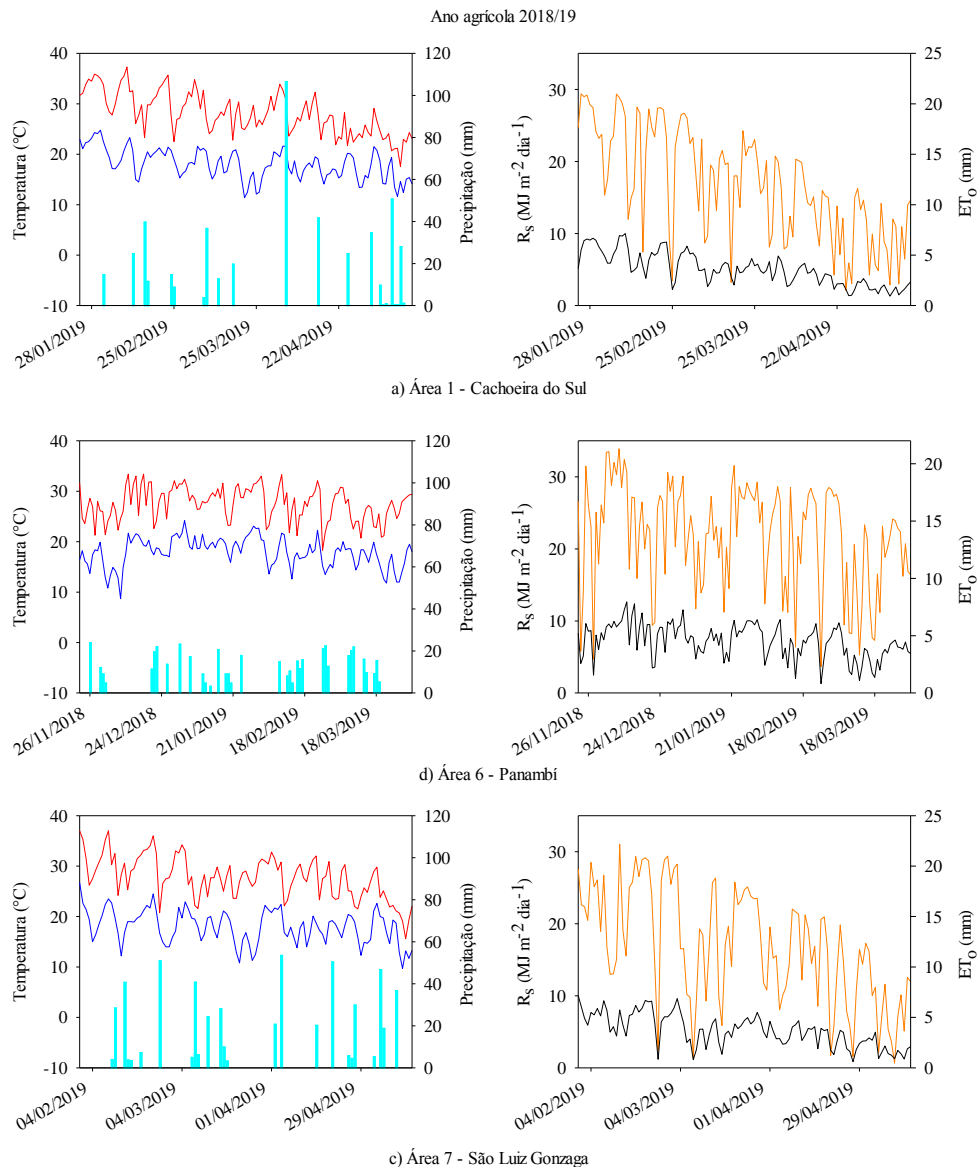


Figura 2 - Temperatura máxima (—, °C) e mínima (—, °C) do ar, precipitações (—, mm), R_s (—, $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) e ET_0 (—, mm) para as áreas 1 - Cachoeira do Sul (a), 6 - Panambi (b) e 7 - São Luiz Gonzaga (c) no ano agrícola de 2018/19, no Rio Grande do Sul.

No ano agrícola 2017/18, as datas de semeadura variaram desde o dia 23 de outubro (área 2, em Cachoeira do Sul) até 15 de janeiro (área 5, em São Luiz Gonzaga). A área 2 tem como característica uma semeadura precoce, quando as temperaturas estão ainda mais amenas, e menor demanda evaporativa. Em 2017/2018, a frequência de chuvas foi menor no início do ciclo, fator que favoreceu o estabelecimento inicial da cultura (Figura 1a). As áreas 3 e 4 apresentam uma condição de maior demanda evaporativa, acompanhada de chuvas mais regulares (Figura 1b e c). Por sua vez, a área 5 caracteriza-se como um plantio de “safrinha”, o qual ocorre após o cultivo de milho, com dois cultivos no mesmo ano agrícola. Nesta área,

observa-se alta demanda evaporativa no início do ciclo, em meados de janeiro, a qual diminui consideravelmente da fase intermediária para a final, devido às condições mais amenas, finalizando o ciclo com ET_o entre 3 e 4 $mm\ dia^{-1}$ (Figura 1d).

Para o ano agrícola de 2018/19, observa-se dois cultivos de safrinha, com semeadura em janeiro, sendo a área 1 (Figura 2a) e a área 7 (Figura 2c), onde também se observa alta demanda evaporativa no início da estação, em torno de 9 $mm\ dia^{-1}$, decrescendo para valores de ET_o próximos de 2 $mm\ dia^{-1}$ ao final do cultivo. A área 6 (Figura 2b), com semeadura em 26 de novembro, apresenta comportamento similar às áreas 3 e 4.

Na Figura 3 e Figura 4 é apresentada a variação dos parâmetros meteorológicos diários durante o cultivo do milho, sendo temperatura máxima e mínima do ar ($^{\circ}C$), precipitações (mm), radiação global incidente (R_s) e evapotranspiração de referência (ET_o), observados durante os anos agrícolas 2017/18 (Figura 3) e 2018/19 (Figura 4).

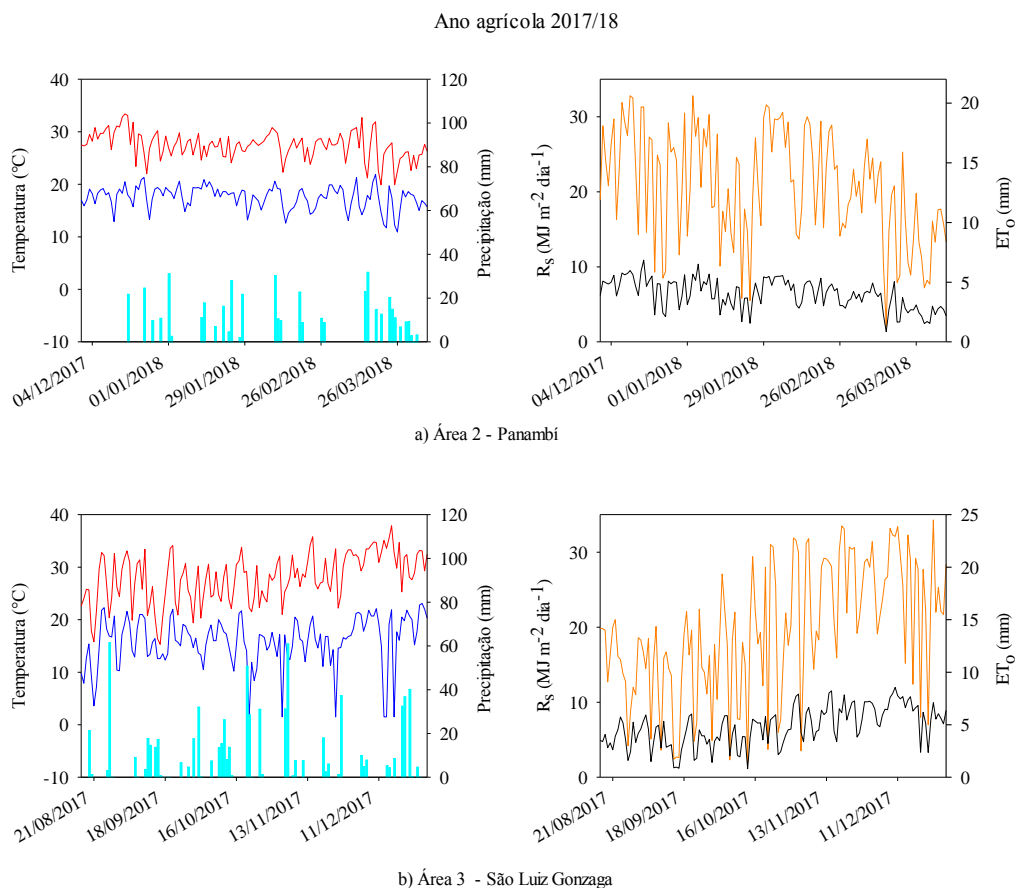


Figura 3 - Temperatura máxima (—, $^{\circ}C$) e mínima (—, $^{\circ}C$) do ar, precipitações (—, mm), R_s (—, $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$) e ET_o (—, mm) para as áreas 2 - Panambi (a) e 3 - São Luiz Gonzaga (b), no ano agrícola de 2017/18, no Rio Grande do Sul.

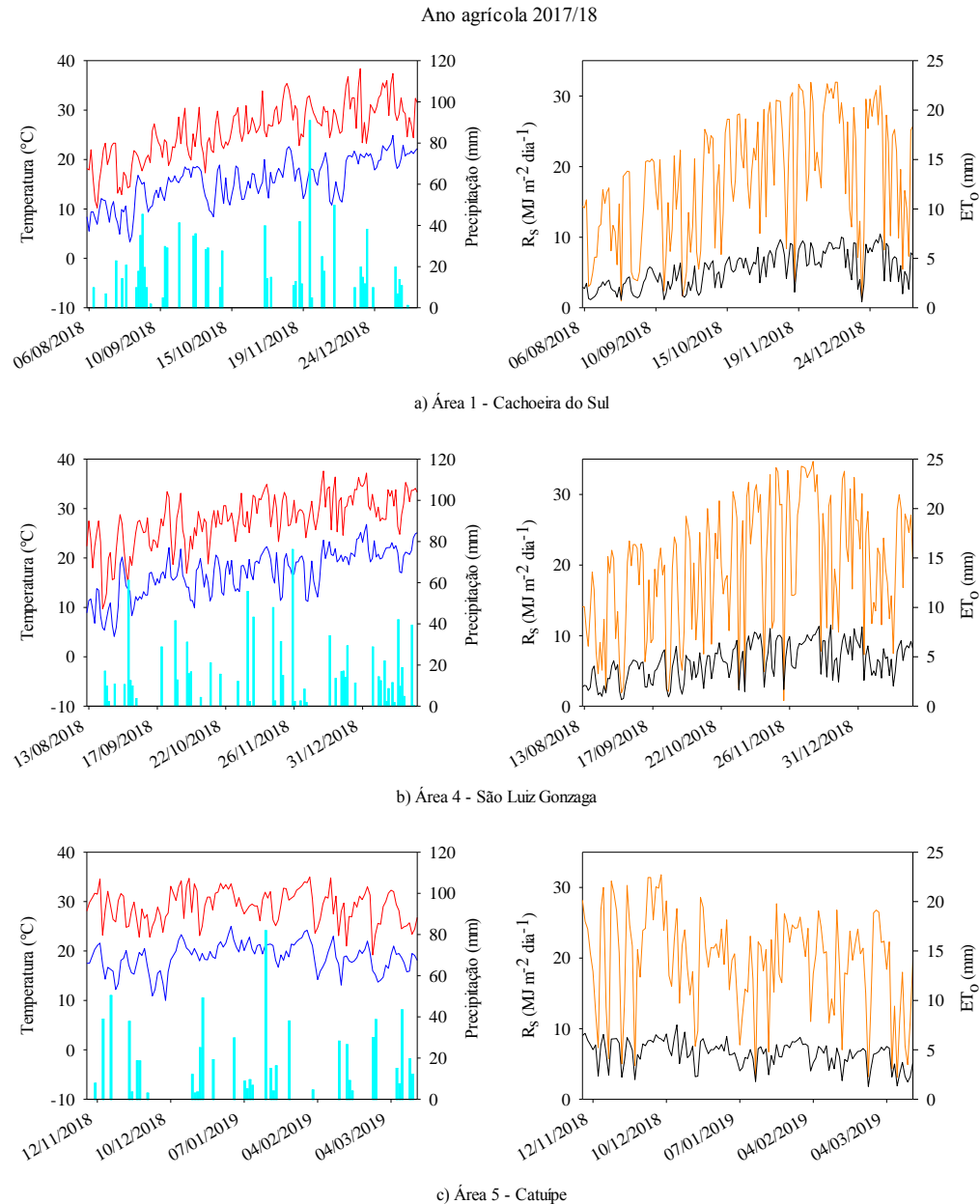


Figura 4 - Temperatura máxima (—, °C) e mínima (—, °C) do ar, precipitações (—, mm), R_s (—, $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e ET_0 (—, mm) para as áreas 1 – Cachoeira do Sul (a), 4 – São Luiz Gonzaga (b) e 5 - Catuípe (c), do ano agrícola de 2018/19, no Rio Grande do Sul.

Os dados apresentados são referentes aos períodos entre as datas de semeadura e colheita de cada área (Tabela 3). Em semeaduras precoces, que ocorreram no mês de agosto, nas áreas 3 (2017/18) (Figura 3b), e nas áreas 1 e 4 (2018/19) (Figura 4a e b), é possível observar que, no início do cultivo, as condições são de baixa demanda evaporativa da atmosfera, caracterizada por temperaturas mínimas em torno de 10°C e máximas em torno de 25°C . A R_s não ultrapassando os $20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e ET_0 próximo a 5 mm dia^{-1} . Por outro lado, semeaduras

mais tardias tendem a apresentar altas ET_o , desde o início do cultivo com valores chegando próximos de 10 mm dia^{-1} . A precipitação, varia conforme o local e data.

6.1. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO SIMDualKc

Na Tabela 8 são apresentados os parâmetros da cultura, parâmetros de evaporação do solo, do escoamento superficial e percolação profunda iniciais e calibrados para o modelo SIMDualKc na área 1, para os cultivo de soja e milho. Os procedimentos de calibração e validação do modelo SIMDualKc seguiram a metodologia descrita na literatura (ROSA et al., 2012a; GIMENEZ et al., 2017; PAREDES et al., 2018a e b; PEREIRA et al., 2015a; MARTINS et al., 2013).

Tabela 8 - Valores iniciais e calibrados dos coeficientes basais de cultivo (K_{cb}), depleção para não estresse (p), e parâmetros de evaporação do solo, escoamento superficial e percolação profunda, para os cultivos de soja e milho irrigado (calibração) e de sequeiro (validação) na área 1.

Parâmetros		Inicial	Calibrado
Parâmetros de cultura			
SOJA	$K_{cb \text{ ini}}$	0,15	0,10
	$K_{cb \text{ mid}}$	1,10	1,08
	$K_{cb \text{ end}}$	0,35	0,60
	p_{ini} , p_{mid} e p_{end}	0,50	0,40
MILHO	$K_{cb \text{ ini}}$	0,20	0,15
	$K_{cb \text{ mid}}$	1,12	1,12
	$K_{cb \text{ end}}$	0,80	0,70
	p_{ini} , p_{mid} e p_{end}	0,50	0,40
Parâmetros da evaporação do solo			
	REW (mm)		9
	TEW (mm)		26
	Z_e (m)		0,10
Parâmetros do escoamento e percolação profunda			
	CN	74	70
	a_D	325	340
	b_D	-0,017	-0,02

$K_{cb \text{ ini}}$, $K_{cb \text{ mid}}$ e $K_{cb \text{ end}}$ são os coeficientes de cultivo basal inicial, médio e final; p_{ini} , p_{mid} e p_{end} são fatores de depleção para não estresse, nos estágios inicial, médio e final, respectivamente. REW e TEW são água prontamente disponível e total de água na camada evaporável; Z_e é a espessura da camada evaporável, CN é a curva número para estimativa do escoamento superficial; a_D e b_D são parâmetros da equação para estimativa da percolação profunda (LIU; PEREIRA; FERNANDO, 2006)

Para a soja, os valores calibrados de K_{cb} foram de 0,10, 1,08 e 0,60 para o $K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ mid}$ e $K_{cb\ end}$, respectivamente, enquanto que, para o cultivo do milho, observou-se os valores de 0,15, 1,12 e 0,70 para o $K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ mid}$ e $K_{cb\ end}$, respectivamente. Os fatores de depleção para não estresse foram ajustados em 0,40, para ambas as culturas, o que significa que as culturas estavam sob estresse hídrico quando 40% da TAW havia sido depletada, ou seja quando a RAW é atingida (Tabela 6). Comparando-se os valores calibrados com os valores iniciais reportados por Gimenez et al. (2017), o qual calibrou e validou o modelo SIMDualKc para a soja no Uruguai, observa-se pequena diferença para o $K_{cb\ mid}$, porém, maiores diferenças foram observadas para o $K_{cb\ ini}$ e, principalmente, o $K_{cb\ end}$. Para o milho, o valor calibrado de $K_{cb\ mid}$ (1,12) é corroborado por aqueles encontrados por Martins et al. (2013), enquanto que, para o $K_{cb\ ini}$ e $K_{cb\ end}$, observou-se valores ligeiramente menores.

Os valores de K_{cb} são dependentes principalmente da área foliar da cultura, a qual transpira e perde água para a atmosfera (ALLEN; PEREIRA, 2009). Para ambas as culturas, observa-se diferenças no IAF para diferentes cultivares, o que interfere nos valores de K_{cb} . Para as mesmas cultivares, a época de semeadura e o local de semeadura influenciam na expansão foliar, bem como na disponibilidade de água e nutrientes (SETIYONO et al., 2010). Em menor parte, o valor do K_{cb} depende também da demanda atmosférica (ALLEN et al., 1998; ALLEN et al., 2005a).

No caso do milho, a diferença no valor de $K_{cb\ ini}$ encontrado pode ser atribuída às épocas de semeadura distintas, uma vez que, no trabalho de Martins et al. (2013), a semeadura foi realizada em 06 de outubro, enquanto que, no presente trabalho, a semeadura da área 1 foi realizada em 05 de agosto, utilizando uma cultivar super-precoce. O mês de agosto é caracterizado por temperaturas amenas e baixa disponibilidade de radiação, resultando em menores valores de ET_o (Figura 3 e Figura 4), resultando em valores menores para o $K_{cb\ ini}$.

O $K_{cb\ end}$, em contrapartida, é dependente do momento da colheita, sendo que, quando a colheita for realizada mais próxima da maturidade fisiológica da cultura, porém, com umidade dos grãos ainda elevados (acima de 20%), valores maiores de $K_{cb\ end}$ são observados, devido a planta estar com maior área foliar fotossinteticamente ativa (IAF). O $K_{cb\ mid}$ calibrado para a soja no presente estudo (1,08) foi ligeiramente menor que aquele encontrado por Gimenez et al. (2017), no Uruguai, e maior que os encontrados por Wei et al. (2015), o qual encontrou o valor de 1,05 para o cultivo da soja, nas planícies no norte da China.

Para os parâmetros de E_s , o valor de Z_e (0,10 m) reflete as condições de um solo franco arenoso (ALLEN et al., 1998; ROSA et al., 2012a); o valor de Z_e difere daqueles calibrados por

Martins et al. (2013) e Paredes et al. (2018b), os quais encontraram o valor de 0,15 m para um solo de características semelhantes. Valores recomendados por Allen et al. (1998) para Z_e variam de 0,10 a 0,15 m, com 0,1 m para solos de partículas grosseiras (arenosos) e 0,15 m para solos de textura fina (argilosos). O solo desta área é classificado como de textura franco arenosa (SOIL SURVEY STAFF, 2011), apresentando 572 g Kg^{-1} de areia total na camada superficial (Tabela 2). A fração areia apresenta baixa quantidade de microporos, diminuindo a profundidade em que a água possa ascender até a superfície por capilaridade (BRADY e WEIL, 2016) para ser evaporada pela ação dos fatores meteorológicos, principalmente pela incidência de radiação solar na superfície do solo exposto.

O valor de CN calibrado para o escoamento superficial foi de 70, que é menor do que aqueles encontrados por Paredes et al. (2018b) para a cultura do Tifton e Martins et al. (2013) para o milho, em solo franco arenoso na região de Santa Maria - RS, os quais calibraram uma CN de 74 e 75, respectivamente. Uma menor CN significa uma menor perda de água por escoamento para um mesmo evento de molhamento (precipitação ou irrigação). Essa menor perda de água por escoamento pode ser explicada pela grande quantidade de resíduos da cultura antecessora, que favoreceu a infiltração de água no solo, diminuindo o escoamento superficial (ALLEN et al., 2007). Outro fator que pode ter ocasionado a redução na CN foi a condição de cultivo comercial, com área maior do que a área de bordadura que a de uma parcela de experimento, onde o caminho para o escoamento da água pode ser facilitado.

Os parâmetros a_D e b_D para a estimativa da percolação profunda (DP) calibrados foram de 340 e -0,022, respectivamente. Para o a_D , o valor de 340 é intermediário aos valores θ_{SAT} (0,436) e θ_{CC} (0,309). Da mesma forma, o valor de -0,02 para b_D está de acordo com a textura do solo, sendo que solos arenosos drenam mais rápido que solos argilosos (LIU; PEREIRA; FERNANDO, 2006).

Na Figura 5 é apresentada a variação diária da água disponível no solo (ASW) simulada (ASW_{sim}) e observada (ASW_{obs}) para a soja e milho em cultivo irrigado e sequeiro da área 1, assim como as precipitações ocorridas e irrigações aplicadas durante o ciclo. Os resultados da comparação entre os dados observados de ASW e os simulados são apresentados na Figura 6. Tanto na Figura 5, como nos indicadores estatísticos apresentados na Figura 6, pode-se observar a eficiência do modelo em simular a ASW_{obs} , para ambas as culturas, em condição irrigada e de sequeiro. Observa-se limites maiores de água disponível às plantas na área irrigada, o que era esperado, e com previsões muito próximas da ASW observada.

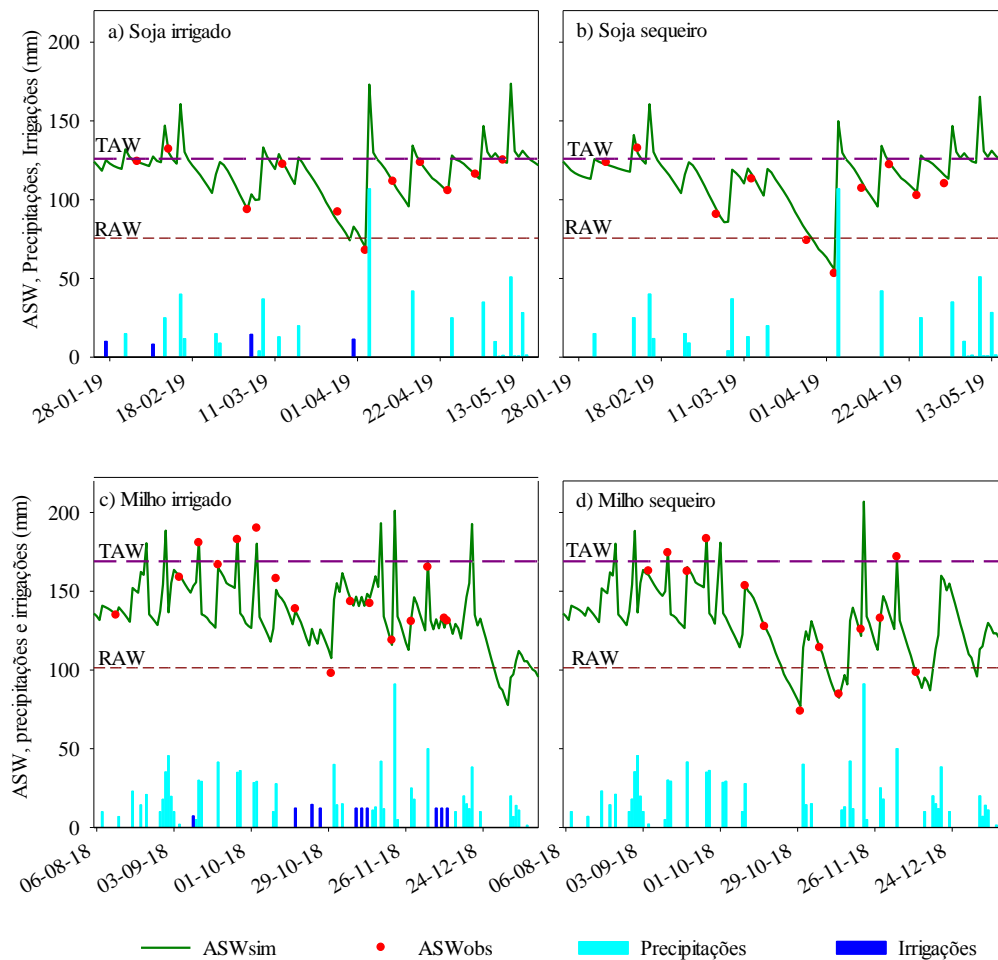


Figura 5 - Variação diária da água disponível no solo simulada (ASW_{sim}) e observada (ASW_{obs}) para a soja irrigada (a - calibração), soja sequeiro (b - validação), milho irrigado (c - calibração) e milho sequeiro (d - validação) na área 1. Linhas tracejadas representam o total de água disponível (—, TAW, mm) e a água facilmente disponível (---, RAW, mm) e barras verticais representam as precipitações e irrigações. Safra 2018/19, Rio Grande do Sul.

A análise dos indicadores apresentados na Figura 6 evidencia um bom ajuste, com valores de R^2 variando de 0,93 (milho irrigado) a 0,99 (soja irrigada e milho sequeiro), indicando alta correlação entre os dados observados e simulados. Os valores de b_0 e P -bias, indicam leve subestimação do modelo na soja irrigada, milho irrigado e de sequeiro e leve superestimação no cultivo de soja de sequeiro. Zhao et al. (2013) encontraram valores de b_0 variando de 0,99 a 1,01, e valores de R^2 maiores de 0,88 quando aplicaram o modelo SIMDualKc para simular a umidade do solo em cultivos de rotação de trigo e milho.

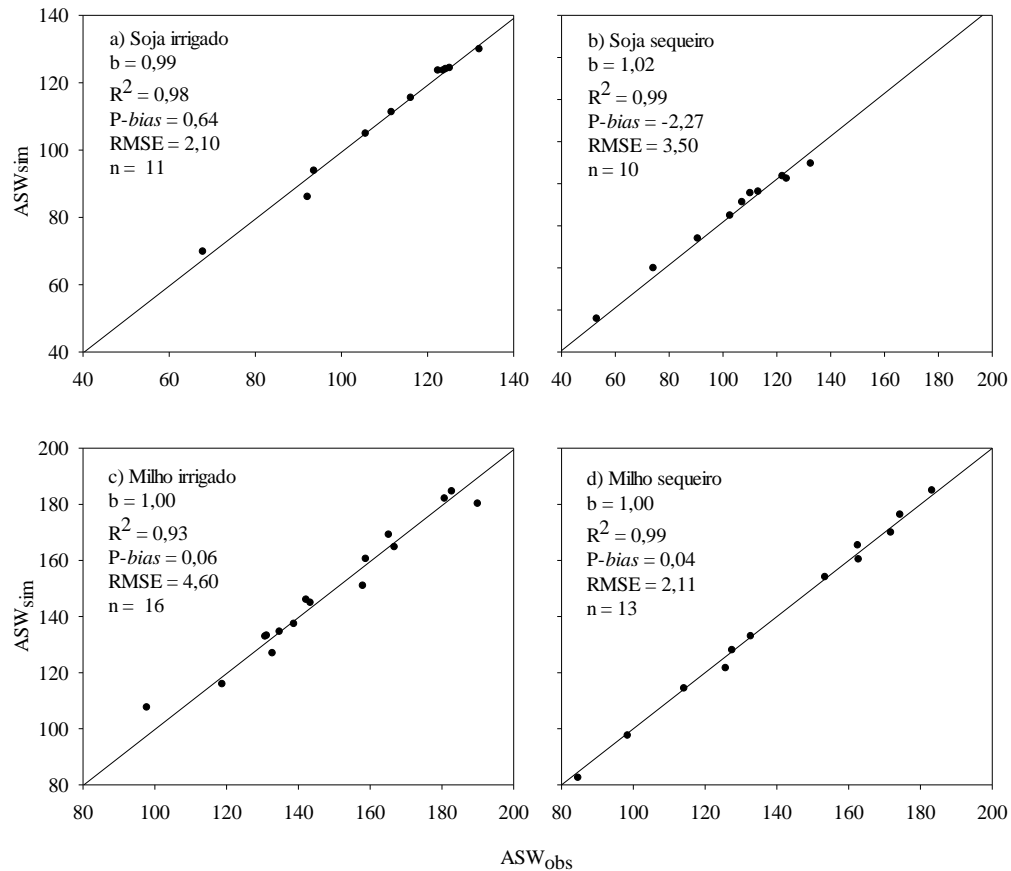


Figura 6 - Comparação entre os valores observados (ASW_{obs}) e simulados (ASW_{sim}) de água disponível no solo para a soja irrigada (a - calibração), soja de sequeiro (b - validação), milho irrigado (c - calibração) e milho de sequeiro (d - validação) na área 1, na safra 2018/19, no Rio Grande do Sul.

O RMSE encontra-se dentro de uma faixa de valores adequados aos reportados na literatura (WEI et al., 2015; GIMÉNEZ et al., 2017; PAREDES et al., 2014a; DING et al., 2013; ZHAO et al., 2013; ZHANG et al., 2013; PEREIRA et al., 2015a; PAREDES et al., 2018a; PAREDES et al., 2018b). Os valores de RMSE para a soja corresponderam a 1,67 e 2,78% do TAW, para o cultivo irrigado e sequeiro, respectivamente. Enquanto para o milho, observou-se valores correspondendo a 2,73 e 1,25% em relação a TAW, para o cultivo irrigado e de sequeiro, respectivamente. Aplicando o mesmo modelo para a região de Santa Maria, em solos similares, Martins et al. (2013) encontraram valores médios de RMSE em relação a TAW de 2,6%, com variação de 2,0 a 3,2%, para o milho. Para Tifton 85, Paredes et al. (2018b) encontraram valores de RMSE variando de 4,2 a 5,2 mm para a calibração e de 5,0 a 7,2 mm na validação, também para a região de Santa Maria. Para a soja, Gimenez et al. (2017) encontraram valores de b_0 variando de 0,95 a 1,01, R^2 de 0,74 a 0,86 e RMSE de 0,014 a 0,025 $cm^3 cm^{-3}$.

Na Figura 7 é demonstrada a variação do K_{cb} , do $K_{cb\ act}$, do K_e e do $K_{c\ act}$ para a soja e milho em cultivo irrigado e de sequeiro, na área 1. Comparando os cultivos irrigados e de sequeiros, é possível verificar um comportamento muito similar, o que era esperado, pelo fato de se tratar da mesma cultivar/híbrido, nas mesmas condições de solo, clima e manejo e, sobretudo, pela distribuição e total de chuvas no período.

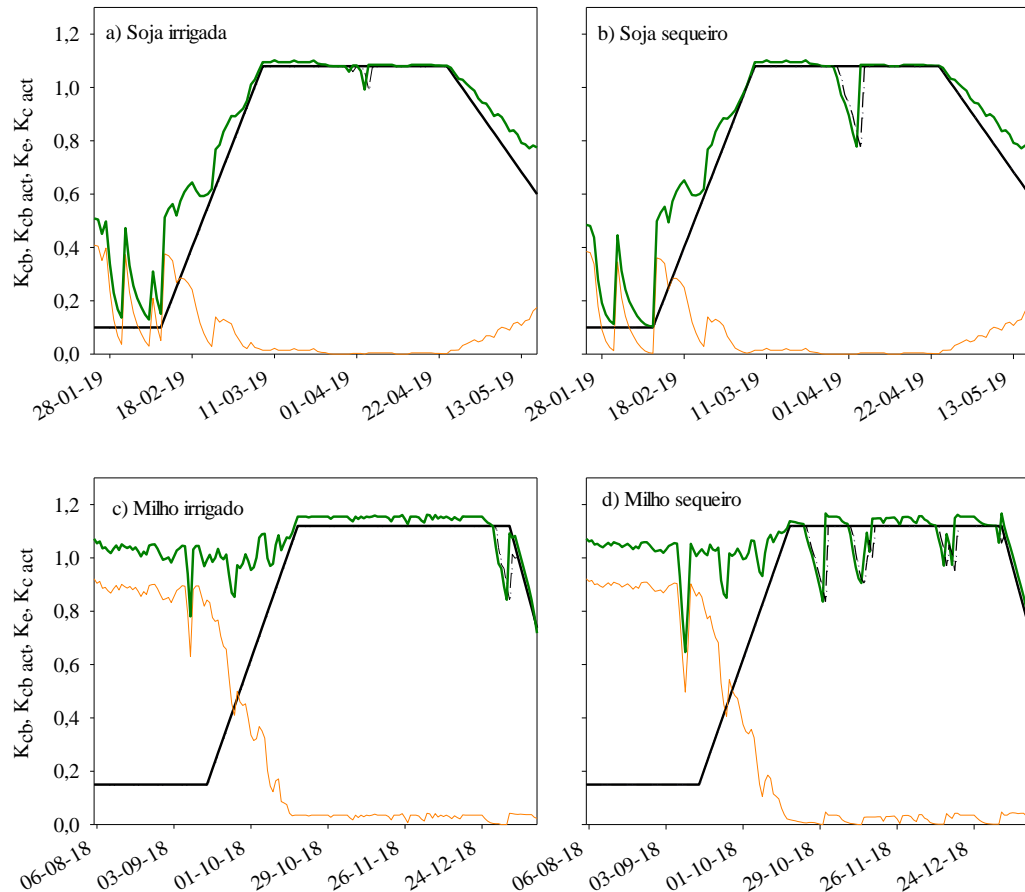


Figura 7 - Variação diária do coeficiente de cultivo basal (K_{cb}), coeficiente de cultivo basal atual ($K_{cb\ act}$) coeficiente de evaporação (K_e) e coeficiente de cultivo atual ($K_{c\ act}$) para a soja irrigada (a - calibração), soja de sequeiro (b - validação), milho irrigado (c - calibração) e milho de sequeiro (d - validação) na área 1, no ano agrícola 2018/19, no Rio Grande do Sul.

Analisando-se o $K_{cb\ act}$, observa-se a ocorrência de déficit hídrico para as duas culturas, sendo mais intenso no cultivo de sequeiro. Sempre da ocorrência de um período de déficit hídrico, tem-se a computação do coeficiente de estresse (K_s) (ROSA et al., 2012a), o qual acarreta na redução do $K_{cb\ act}$ e $K_{c\ act}$

Para a soja, o mesmo pode ser observado no período intermediário, mais precisamente entre os dias 29/03 e 03/04, nos estádios R3 e R4, quando ocorre a formação de legumes onde se verificou a ocorrência de um déficit na soja de sequeiro. No milho de sequeiro, é possível

observar a ocorrência de déficit hídrico, de maneira mais significativa, o qual ocorreu durante o estágio intermediário, em três períodos (24/10/2018 a 30/10/2018, 09/11/2018 a 16/11/2018 e 11/12/2018 a 17/12/2018). Durante esses períodos, a cultura estava entre os estádios fenológicos VT e R4, nos quais ocorre a polinização e início de enchimento dos grãos.

O início e fim dos estádios de desenvolvimento, que foram determinados seguindo as recomendações de Allen et al. (1998) e Rosa et al (2012a e b), não apresentaram alterações significativas entre as datas calibradas no modelo (Figura 7) e as observadas a campo (Tabela 4 e Tabela 5).

6.2. ESTIMATIVA DO $f_{c\text{NDVI}}$ E IAF_{NDVI}

A f_c ou IAF, mensurados de forma periódica (semanal), são parâmetros necessários para a aplicação de modelos de BH, como o SIMDualKc. Entretanto, a necessidade de observar as datas e valores dessas variáveis limita o uso de muitos modelos, pois precisa-se de muitas observações de campo, as quais requerem tempo e recursos para serem realizadas. Assim, resultados preliminares obtidos mediante observações de superfície continuadas do IAF, altura de planta e/ou f_c são apropriadas para serem integradas em escalas espaciais e temporais de interesse, em áreas maiores.

A relação entre a fração de cobertura observada ($f_{c\text{obs}}$) e a fração de cobertura estimada por NDVI ($f_{c\text{NDVI}}$) para a cultura da soja, de acordo com a metodologia proposta por Poças et al. (2015a), utilizando os dados observados da área 1, é apresentada na Figura 8. Observa-se alta concordância entre os valores observados e simulados, tanto para a área irrigada (calibração), como para a área de sequeiro (validação), com valores de b_0 próximos a 1,00, o $R^2 > 0,99$ e $P\text{-bias}$ variando de -1,89 (irrigado) a 1,87 (sequeiro). Poças et al. (2015a) encontraram valores de b_0 de 1,07 e 1,04 e R^2 de 0,81 e 0,96 para o milho e a cevada, respectivamente. No mesmo trabalho, os valores de RMSE para o milho e cevada foram de 0,10 e 0,06, respectivamente. Pelos indicadores estatísticos apresentados, principalmente observando o RMSE (0,02) para ambas as áreas, pode-se inferir que a metodologia é adequada para a estimativa da $f_{c\text{NDVI}}$ para as demais áreas de soja do presente estudo.

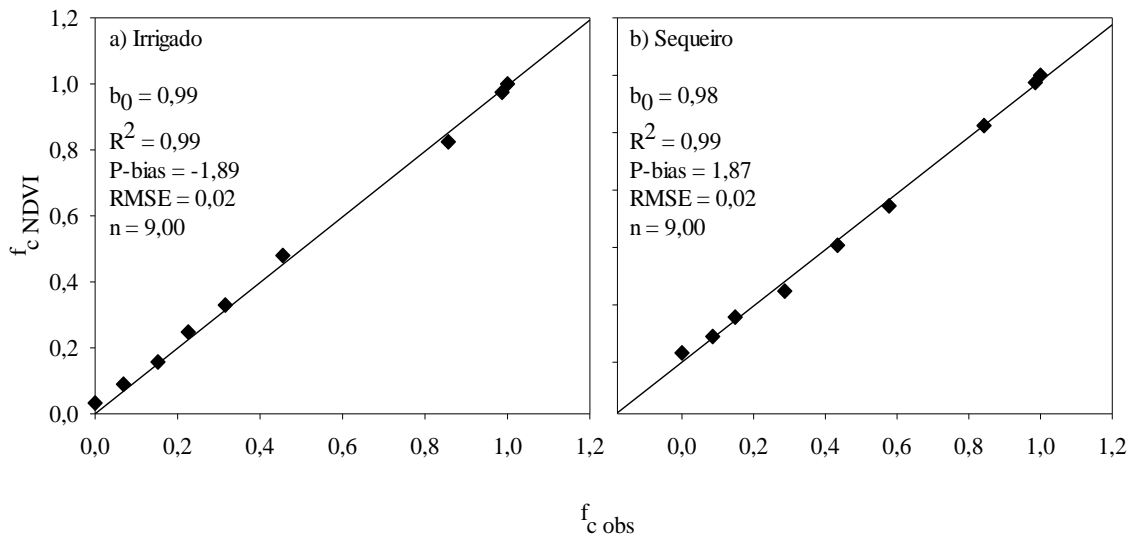


Figura 8 - Relação entre a fração de cobertura obtida por NDVI ($f_{c\text{ NDVI}}$) e a fração de cobertura observada ($f_{c\text{ obs}}$) da soja irrigada (a - calibração) e de sequeiro (b - validação) na área 1. Os indicadores estatísticos apresentados são, o coeficiente linear (b_0) e o coeficiente de determinação (R^2), a porcentagem de viés ($P\text{-bias}$), a raiz quadrada do quadrado médio do erro (RMSE) e o número de observações (n).

A estimativa de parâmetros como a f_c para a calibração e validação de modelos de balanço hídrico tem sido reportado na literatura. Er-Raki et al. (2007) encontraram alta correlação ($R^2 = 0,89$) entre a f_c observada e o NDVI, utilizando a f_c derivada de NDVI para a calibração do modelo SIMDualKc para a cultura do trigo, incluindo a determinação da duração dos estádios (inicial, intermediário e final), bem como, para a estimativa do valor do K_{cb} . Resultados similares foram reportados para a cultura do trigo por Le Page et al. (2014), no Marrocos, e para a cultura do tomate, por Jayanthi, Neale e Wright (2007).

Na Figura 9 é apresentada a calibração e validação de um modelo de regressão para a estimativa do IAF do milho. Os indicadores estatísticos utilizados na validação da regressão apresentados na Figura 9b, demonstram a acurácia para a estimativa do IAF na área de sequeiro (Área 1), com R^2 de 0,98, o que indica alta correlação entre dados observados e estimados pelo NDVI. O b_0 foi de 1,01 e $P\text{-bias}$ de -4,08, indicando leve superestimação pelo modelo em comparação aos dados observados. O RMSE pode ser considerado aceitável (0,29), o qual representa menos de 5% em relação ao máximo IAF encontrado no presente estudo. A adequada precisão na estimativa do IAF_{NDVI} pela equação apresentada na Figura 9 pode ser atribuída, em grande parte, a utilização de imagens de satélite com alta resolução espacial (10 m) como é o caso dos sensores 2A e 2B a bordo do satélite Sentinel. Richetti et al. (2019) utilizaram NDVI derivado de imagens do satélite MODIS, o qual possui resolução espacial de 250 m e

concluíram que o IAF derivado de NDVI apresentou resultados similares ao IAF observado a campo para a calibração do CSM-CROPGRO-Soybean. Erros comumente observados na derivação do IAF a partir do NDVI são relacionados a presença de plantas daninhas, o que não foi verificado nesse trabalho, uma vez que, a presença de invasores foi pequena ou insignificante.

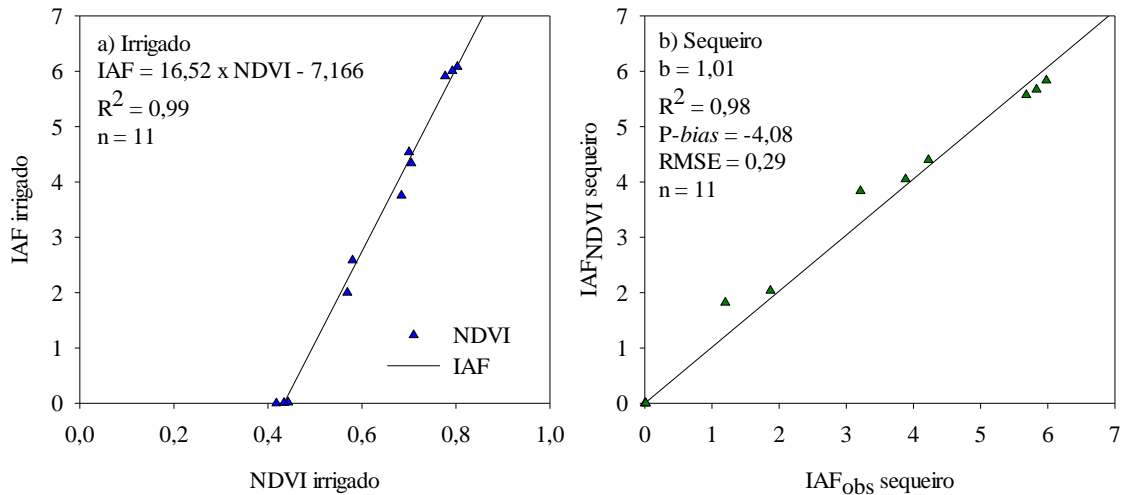


Figura 9 - Calibração e validação de regressão para a estimativa do índice de área foliar em função do NDVI derivado de imagens de satélites, utilizando dados observados do cultivo de milho irrigado (a - calibração) e sequeiro (b - validação) na área 1. Os indicadores estatísticos apresentados são, o coeficiente linear (b_0) e o coeficiente de determinação (R^2), a porcentagem de viés ($P-bias$), a raiz quadrada do quadrado médio do erro (RMSE) e o número de observações (n).

Muitos são os exemplos da utilização do NDVI para a parametrização de modelos, como o da utilização de NDVI para a validação espacial de modelos para agricultura de precisão (BASSO et al., 2001), modelos de estimativa de rendimento de grãos (PRASAD et al., 2006; BASTIAANSEN e ALI, 2003), estimativa de coeficientes basais de cultivo e evapotranspiração de milho (CAMPOS et al., 2017a), estimativa da produtividade da água, biomassa e rendimento de grãos de milho e soja (CAMPOS et al. 2017b) e estimativa da evapotranspiração da cultura e conteúdo de água no solo (NEALE et al., 2012).

Tendo em vista os bons indicadores estatísticos encontrados, tanto para a estimativa da f_c da soja, como do IAF do milho, e a grande utilização deste índice de vegetação para a calibração de modelos agrícolas, considerou-se adequado a utilização destas metodologias para aplicação no modelo SIMDualKc nas demais áreas de estudo.

6.3. VALIDAÇÃO DO MODELO SIMDUALKC COM f_c NDVI e IAF_{NDVI}

Para as áreas de validação do SIMDualKc combinado com o índice NDVI para a soja e o milho, os valores calculados dos parâmetros de E_s , RO e DP são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores validados dos parâmetros de evaporação do solo, escoamento superficial e percolação profunda, para a soja, nas áreas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 e milho, nas áreas 2, 3, 4 e 5, nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/19, no Rio Grande do Sul.

SOJA						
Parâmetros	Área 2	Área 3	Área 4	Área 5	Área 6	Área 7
Evaporação do solo						
REW (mm)	10,00	7,00	8,00	8,00	8,00	8,00
TEW (mm)	20,00	44,00	36,00	41,00	47,00	41,00
Z_e (m)	0,10	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Escoamento superficial						
CN	80	80	80	80	85	80
Percolação profunda						
a_D	320	460	460	440	430	440
b_D	-0,0500	-0,0100	-0,0173	-0,0173	-0,0173	-0,0173
MILHO						
	Área 2	Área 3 e 4		Área 5		
Evaporação do solo						
REW (mm)	8	8		7		
TEW (mm)	39	41		44		
Z_e (m)	0,15	0,15		0,15		
Escoamento superficial						
CN	85	80		80		
Percolação profunda						
a_D	400	410		420		
b_D	-0,02	-0,02		-0,02		

REW e TEW são água prontamente disponível e total de água na camada evaporável; Z_e é a espessura da camada evaporável, CN é a curva número para estimativa do escoamento superficial; a_D e b_D são para da equação para estimativa da percolação profunda (LIU; PEREIRA; FERNANDO, 2006).

Para a E_s , observa-se menor TEW para solos arenosos (área 2-soja), explicado em grande parte pelo Z_e , que é maior para solos argilosos (demais áreas). Isso se deve a maior presença de microporos na camada superficial em solos argilosos (Tabela 2), que permite ascensão capilar da água de maiores profundidades para ser evaporada na superfície pela radiação incidente. No entanto, quando se observa a REW, observa-se o oposto, com um valor maior (10 mm), verificado na área 2, contra 7 a 8 mm nas demais áreas. Esse fato pode ser explicado pela maior retenção de água pelas partículas mais finas de solo, tendo uma menor fração que pode ser facilmente evaporada no solo (BRADY e WEIL, 2016).

A CN calibrada para todas as áreas foi de 80, com exceção da área 6 (soja) e área 2 (milho), onde o valor calibrado da CN foi de 85, que representa, na prática, maiores perdas por RO. O valor de CN é influenciado pela textura do solo e do manejo, que irá se refletir na estrutura (D_s , Ma, Mi e PT), da cobertura do solo e do relevo (ALLEN et al., 2007). Quanto menor a quantidade de resíduos presentes nessa área, maior deve ser o escoamento, uma vez que a ausência de resíduos facilita o RO (ADIMASSU, ALEMU e TAMENE, 2019).

Para a percolação, os valores calibrados de a_D (entre a saturação e a capacidade de campo) e b_D , foram menores para solos arenosos, os quais drenam rapidamente (área 2) e maiores para solos argilosos, onde a drenagem é mais lenta (área 3) (LIU; PEREIRA; FERNANDO, 2006).

Nas Figura 10 e Figura 11 são apresentadas a variação diária da água disponível no solo (ASW) simulada (ASW_{sim}) e observada (ASW_{obs}) para a soja e milho irrigados, respectivamente, assim como, as irrigações aplicadas, precipitações e os valores de RAW e TAW. A Figura 10 corresponde as áreas 2 (a), 3 (b), 4 (c), 5 (d), do ano agrícola 2017/18, e 6 (e) e 7 (f), no ano agrícola de 2018/19, cultivadas com soja. A Figura 11 corresponde as áreas 2 (a) e 3 (b), no ano agrícola de 2017/18, e áreas 4 (c) e 5 (d), do ano agrícola 2018/19, cultivadas com milho. Observa-se algumas falhas nos valores de ASW_{obs} , as quais são oriundas de problemas operacionais com os sensores instalados, devido a falhas de comunicação (GPRS) e armazenamento dos dados. Falhas no início e final do cultivo são decorrentes do atraso na instalação dos sensores e da retirada antecipada dos equipamentos do campo.

Os dados apresentados nas Figura 10 e Figura 11 demonstram boa concordância entre a ASW_{sim} e ASW_{obs} para todas as áreas desse estudo, o que também pode ser visualizado na Tabela 10, onde são apresentados os indicadores estatísticos da comparação entre o ASW_{obs} e ASW_{sim} .

Para a soja, os valores de b_0 variaram de 0,97 a 1,01, indicando pequena sub ou superestimação dos valores de ASW pelo modelo, o que também é confirmado pelos valores do *P-bias*, que variaram de -1,37 a 3,56. Para o milho, os valores de b_0 variaram de 0,97 a 0,99, indicando leve subestimação dos valores de ASW pelo modelo, o que também é confirmado pelos valores do *P-bias*, que variaram de 0,70 a 3,30. O R^2 indica alta correlação entre os dados observados e estimados, tendo variação de 0,86 a 0,98 e 0,89 a 0,96, para soja e milho respectivamente. Os valores de RMSE indicam erros aceitáveis, representando entre 2,96 a 6,52% e 4,50 e 6,30% da TAW para a soja e milho respectivamente, estando dentro das faixas

de erros já reportados na literatura para este modelo, a partir de observações de campo (MARTINS et al., 2013; PAREDES et al., 2018b; GIMENEZ et al. 2017; ZHAO et al., 2013).

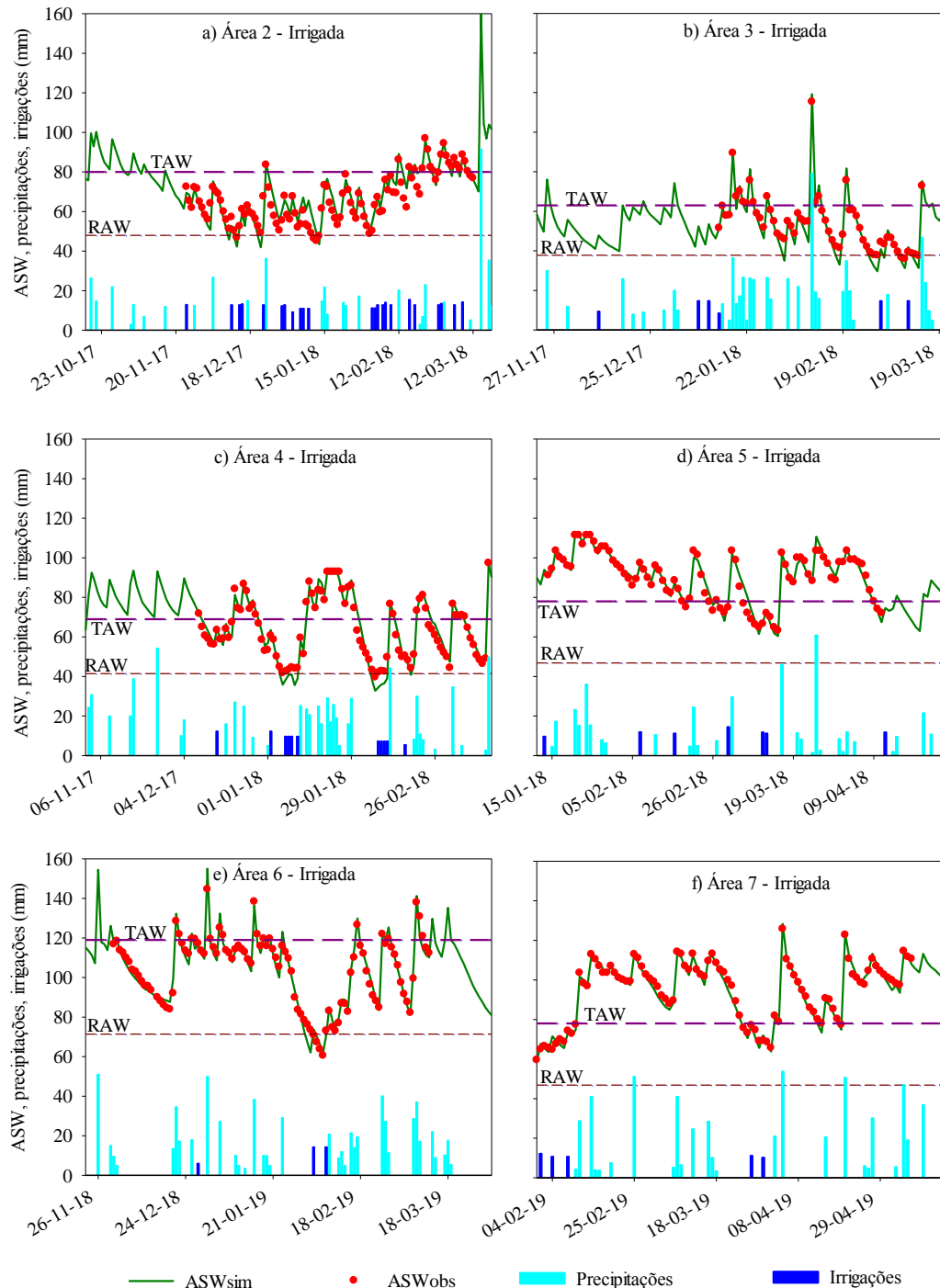


Figura 10 - Variação diária da água disponível no solo (ASW) simulada (ASW_{sim}) e observada (ASW_{obs}) para a soja irrigada, nas áreas 2 (a), 3 (b), 4 (c), 5 (d), do ano agrícola 2017/18 e 6 (e) e 7 (f), no ano agrícola 2018/19, no Rio Grande do Sul. Linhas tracejadas representam o total de água disponível (---, TAW, mm) e a água facilmente disponível (- - -, RAW, mm) e barras verticais representam as precipitações e irrigações.

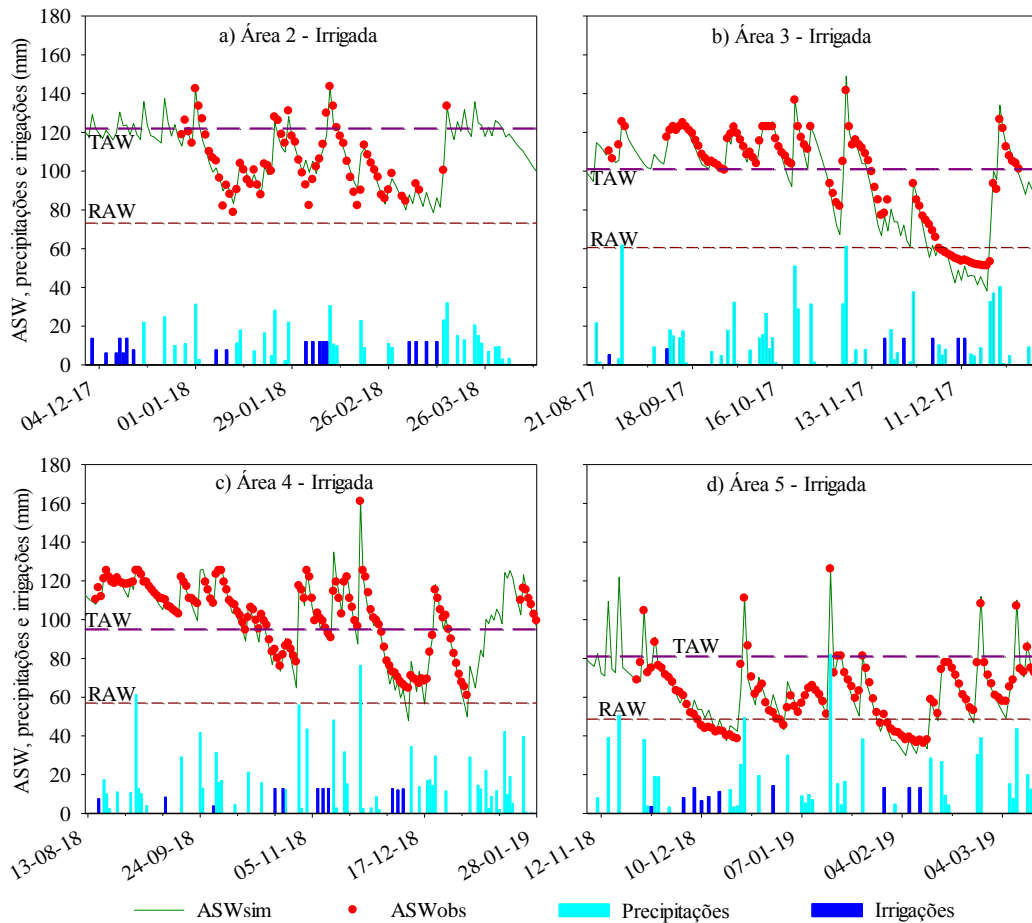


Figura 11 - Variação diária da água disponível no solo simulada (ASW_{sim}) e observada (ASW_{obs}) para o milho irrigado nas áreas 2 (a), 3 (b), 4 (c) e 5 (d). Linhas tracejadas representam o total de água disponível (—, TAW, mm) e a água facilmente disponível (---, RAW, mm) e barras verticais representam as precipitações e irrigações, nos anos agrícolas de 2017/18 e 2018/19, no Rio Grande do Sul.

Estes resultados indicam que a utilização de dados derivados de imagens de satélite se configura em uma boa estratégia, sobretudo devido à dificuldade da aquisição de dados observados de conteúdo de água a campo, como já relatado por diversos autores (RICHETTI et al., 2019; CRUZ-BLANCO et al., 2014).

Segundo Pereira et al. (2015b), desde a publicação do FAO-56, muitos estudos têm sido realizados a fim de determinar a evapotranspiração a partir de sensoriamento remoto, destacando-se duas vertentes. Uma das vertentes se concentra nos estudos dos algoritmos de balanço de energia da superfície para a determinação da evapotranspiração, como o modelo METRIC (ALLEN et al., 2007a e b), o modelo TIM (JIANG; ISLAM, 2001) e o modelo SEBAL (BASTIAANSEN et al., 1998).

Tabela 10 - Indicadores estatísticos entre valores observados (ASW_{obs}) e simulados (ASW_{sim}) de água disponível no solo para as áreas de soja e milho, nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/19, no Rio Grande do Sul.

Área	b_0	R^2	P-bias	RMSE	% TAW	n
SOJA						
2	1,01	0,86	-1,37	4,87	6,08	109
3	0,97	0,96	3,56	4,11	6,52	60
4	1,01	0,95	0,40	3,81	5,52	99
5	1,00	0,96	-0,22	2,63	2,96	89
6	0,98	0,97	1,86	4,01	3,37	101
7	0,99	0,98	1,08	2,43	3,12	97
MILHO						
2	0,99	0,89	0,70	5,49	4,50	68
3	0,97	0,96	3,30	6,35	6,30	104
4	0,98	0,96	2,07	4,85	5,10	145
5	0,98	0,93	2,13	4,75	5,86	111

b_0 : coeficiente linear; R^2 : coeficiente de determinação; P-bias: porcentagem de viés; RMSE: raiz quadrada do quadrado médio do erro (mm); % TAW: Relação entre RMSE e TAW (%); n: número de observações.

Além desses, existem estudos que buscam a determinação do coeficiente basal de cultivo (K_{cb}) a partir de índices de vegetação (MATEOS et al., 2013; GONZÁLEZ-DUGO et al., 2013; POÇAS et al., 2015a). Apesar de se apresentarem relativamente mais precisos, os algoritmos de balanço de energia, combinados com imagens de satélite, são modelos complexos, que necessitam de calibrações com dados robustos, dificultando sua aplicação de maneira operacional, ficando restritos ao ambiente de pesquisa. De acordo com Calera et al. (2017), as experiências acumuladas nos últimos 30 anos suportam o uso operacional do manejo de irrigação baseado em dados espectrais. O autor destaca que o uso operacional de séries temporais de dados multiespectrais, com alta resolução espacial, permite o monitoramento dos parâmetros biofísicos de cultivos agrícolas, os quais são relacionados com o uso da água pela cultura durante seu crescimento.

6.4. PARTICIONAMENTO DA ET_c : COEFICIENTES DE CULTIVO DUAL

As curvas dos coeficientes de cultivo K_{cb} , $K_{cb act}$, K_e e $K_{c act}$ da soja nas áreas 2, 3 e 4, do ano agrícola 2017/18, das áreas 5 e 7 de cultivo safrinha, para os dois anos agrícolas e da área 6, de 2018/19, são apresentadas nas Figura 12, Figura 13 e Figura 14, respectivamente. Para o milho, a Figura 15 apresenta os coeficientes para as áreas 2 e 3, do ano agrícola de 2017/18 e das áreas 4 e 5, de 2018/19.

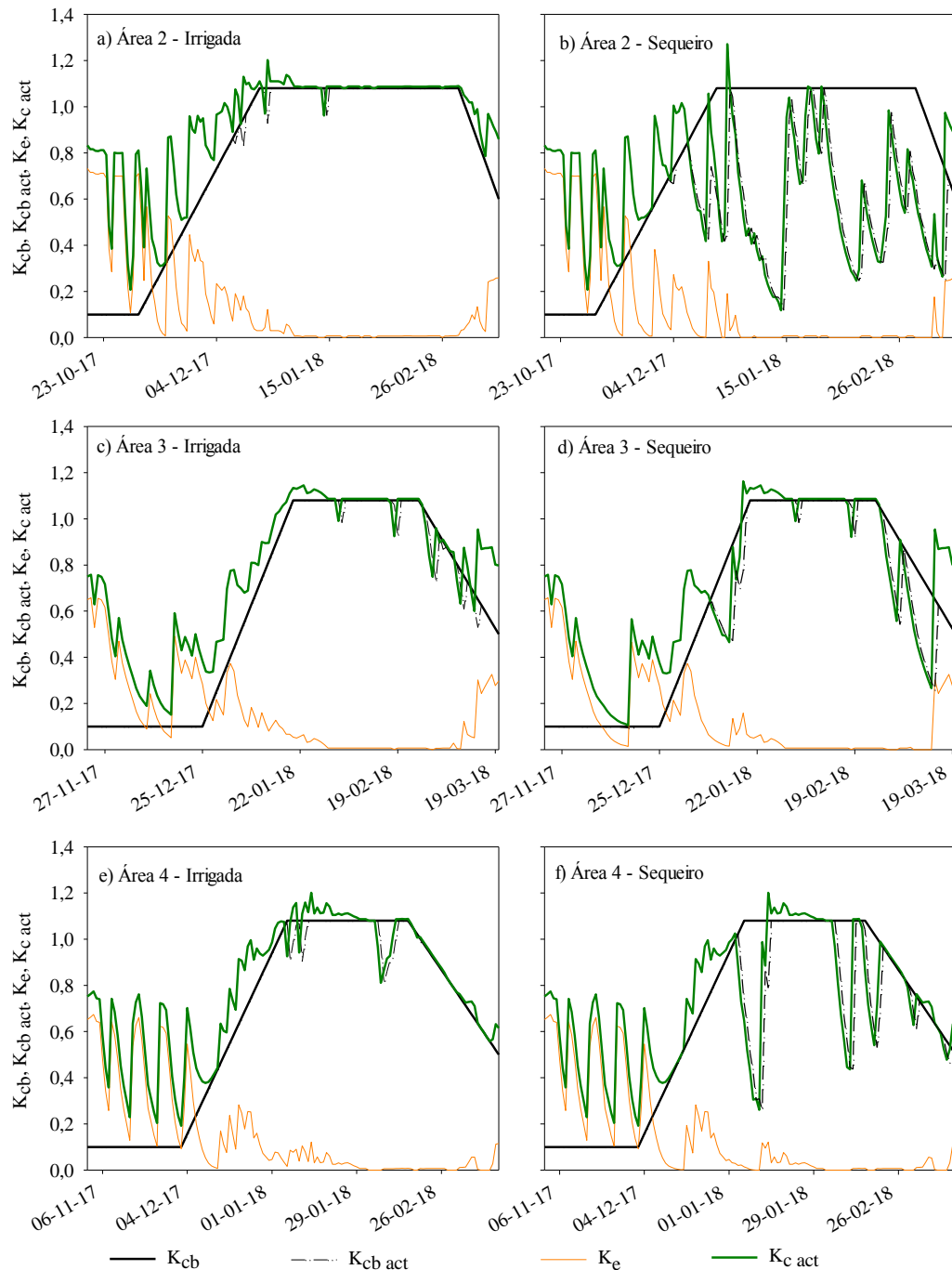


Figura 12 - Variação diária do coeficiente de cultivo basal (K_{cb}), coeficiente de cultivo basal atual ($K_{cb\ act}$) coeficiente de evaporação (K_e) e coeficiente de cultivo atual ($K_{c\ act}$) para a soja irrigada (a, c, e) e sequeiro (b, d, f), nos ano agrícola de 2017/18, no Rio Grande do Sul.

Os coeficientes de cultivo de base (K_{cb}) e o fator de depleção utilizados para estas áreas foram os mesmos calibrados na área 1, apresentados na Tabela 8 e Figura 7, com exceção para o $K_{cb\ end}$, o qual apresentou variação, dependente do momento da colheita, ou seja, quando a colheita for realizada antecipadamente, o valor tende a ser maior do que quando a colheita for realizada mais tardiamente, cuja variação é dependente da quantidade de folhas (IAF) da planta

no momento da colheita. O IAF no momento da colheita pode variar de acordo com diversos fatores, como híbrido, condições climáticas, manejo e ocorrência de doenças. No entanto, depende em grande parte do momento da colheita, ou seja, quando a colheita é realizada logo após a maturidade fisiológica e alto teor de umidade nos grãos, a planta tende a apresentar mais área verde e o valor de $K_{cb\ end}$ é maior, do que quando a colheita é realizada mais tardiamente.

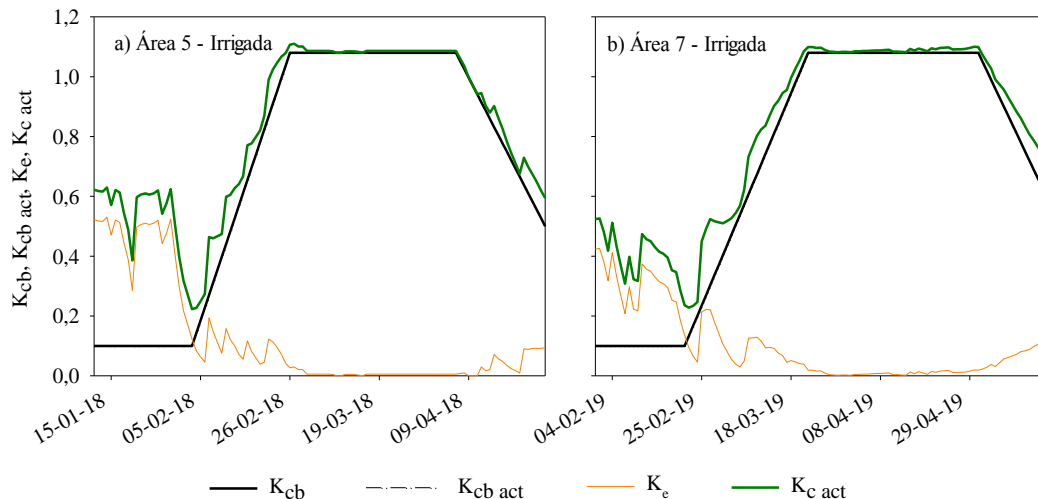


Figura 13 - Variação diária do coeficiente de cultivo basal (K_{cb}), coeficiente de cultivo basal atual ($K_{cb\ act}$) coeficiente de evaporação (K_e) e coeficiente de cultivo atual ($K_{c\ act}$) para a soja irrigada na safrinha, na área 5, em São Luiz Gonzaga, nos anos agrícolas de 2017/18 (a) e 2018/19 (b), no Rio Grande do Sul.

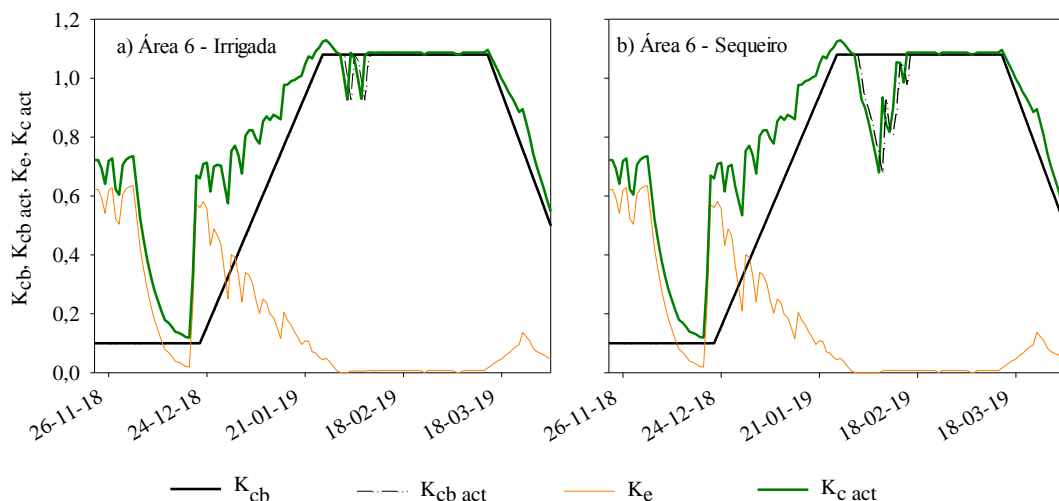


Figura 14 - Variação diária do coeficiente de cultivo basal (K_{cb}), coeficiente de cultivo basal atual ($K_{cb\ act}$) coeficiente de evaporação (K_e) e coeficiente de cultivo atual ($K_{c\ act}$) para a soja irrigada (a,) e de sequeiro (b), no anos agrícola de 2018/19, no Rio Grande do Sul.

Como se utilizou o $f_{c\ NDVI}$ e IAF_{NDVI} para estas áreas, o modelo SIMDualKc calcula a ASW de forma combinada entre o NDVI e os valores previamente calibrados de $K_{cb\ act}$, sendo

o $K_{c\ act}$, determinado pela soma de K_{cb} e K_e , para cada dia. O K_s , é computado pelo SIMDualKc, conforme sugerido por Poças et al. (2015a) e, sempre que o $K_{cb\ act}$ é diferente do K_{cb} nos gráficos das Figura 12, Figura 13, Figura 14 Figura 15, se tem a ocorrência da K_s , ou seja, a cultura está em déficit hídrico.

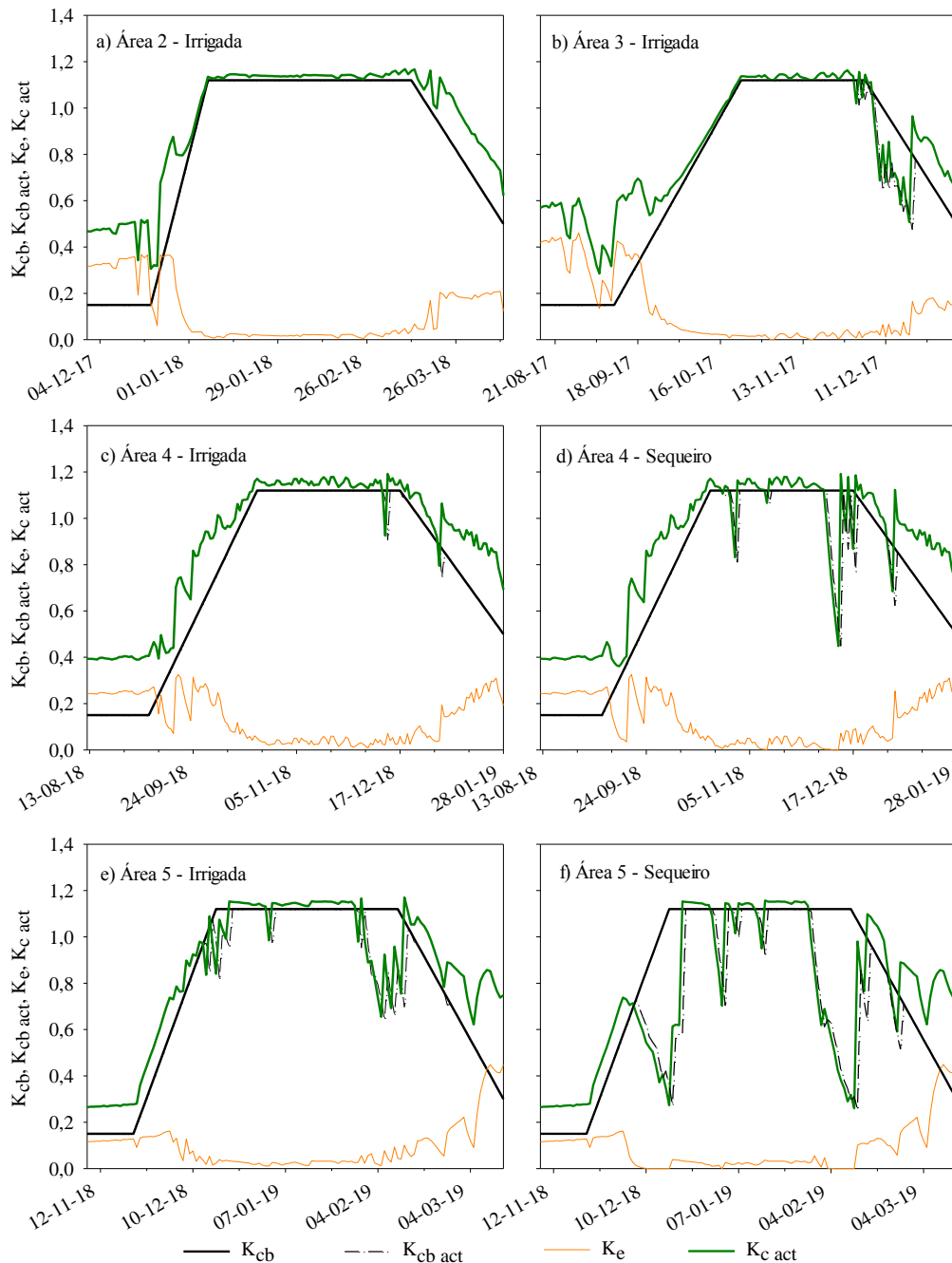


Figura 15 - Variação diária do coeficiente de cultivo basal (K_{cb}), coeficiente de cultivo basal atual ($K_{cb\ act}$) coeficiente de evaporação (K_e) e coeficiente de cultivo atual ($K_{c\ act}$) para o milho nas área 2 (a), 3 (b), irrigadas, 4 (c e d), 5 (e e f), irrigadas e de sequeiro, respectivamente, para os anos agrícolas de 2017/18 e 2018/19, no Rio Grande do Sul.

Observando o comportamento do $K_{cb\ act}$ e $K_{c\ act}$, é possível verificar a magnitude do déficit nas diferentes áreas, sobretudo nas áreas de sequeiro, o que era esperado, devido a menor suplementação hídrica e, principalmente, devido a irregularidade das chuvas, observada nas Figura 1, Figura 2, Figura 3 Figura 4.

O K_e , depende da cobertura do solo, bem como dos eventos de molhamento, sendo maior no início da cultura, quando o solo se encontra exposto, próximo de zero quando a cultura se encontra em pleno desenvolvimento e a superfície é sombreada pelo dossel ($IAF \geq 3.0$). Picos do K_e podem ser observados quando da ocorrência de precipitações e irrigações (ALLEN et al., 1998; ALLEN et al., 2005b). O $K_{cb\ end}$, como relatado anteriormente, depende da data de colheita; assim verificou-se uma variação entre as diferentes áreas, sendo para a soja de 0,6 para as áreas 2 e 7 e de 0,5 para as demais, sendo esses valores superiores ao da área 1, o qual foi calibrado em 0,4 (Tabela 8). Para o milho observou-se valores de 0,5 na área 2, 3 e 4, e 0,3 na área 4, verificando-se valores menores quando comparados com os da área 1 (Tabela 8).

A determinação das datas de início dos estádios seguiram os procedimentos propostos por Allen et al. (1998) e Rosa et al. (2012a), utilizando $f_{c\ NDVI}$ e IAF_{NDVI} , apresentada no Anexo 4 (soja - 2017/18), Anexo 5 (soja - 2018/19) e Anexo 6 (milho).

6.5. COMPONENTES DO BALAÇO HÍDRICO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA

Na Tabela 11 são apresentados os componentes do BH para todas as áreas de soja e milho, nos anos agrícolas de 2017/18 e 2018/19, sendo eles, precipitação, irrigação, $ET_{c\ act}$, escoamento superficial, percolação profunda e variação no armazenamento (ΔASW). As precipitações variaram de 490 a 880 mm e de 523 a 1317, para soja e milho, respectivamente, nos diferentes anos e locais estudados. Como as precipitações são a principal entrada de água em um sistema, todos os demais componentes do balanço hídrico apresentam correlação com a lâmina total de água precipitada durante o ciclo da cultura (SPOHR et al., 2009; ALLEN et al., 2007; GLENN et al., 2007). No entanto, não somente a lâmina total, como a distribuição das precipitações também é um fator importante a ser observado (Figura 1, Figura 2, 3 e 4). Dessa forma, o momento da irrigação e a lâmina irrigada, são diretamente dependentes da não ocorrência de precipitações durante um intervalo de tempo (GLENN et al., 2007).

Tabela 11 - Componentes do balanço hídrico relativo as culturas da soja, nas áreas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 e milho, nas áreas 1, 2, 3, 4 e 5, simulados pelo modelo SIMDualKc, nos anos agrícolas de 2017/18 e 2018/19, no Rio Grande do Sul.

Área		Precipitação	Irrigação	ET _{c act}	RO	DP	Δ ASW
		(mm)					
SOJA							
1	Irrigado	610	44	316	117	225	4
	Sequeiro	610	0	306	138	170	4
2	Irrigado	600	288	610	106	151	-21
	Sequeiro	600	0	398	106	74	-22
3	Irrigado	770	77	441	119	281	-6
	Sequeiro	770	0	402	118	255	5
4	Irrigado	880	98	602	133	222	-21
	Sequeiro	880	0	546	133	188	-13
5	Irrigado	490	83	386	78	121	12
6	Irrigado	841	35	479	162	273	38
	Sequeiro	841	0	469	160	251	39
7	Irrigado	632	55	293	64	287	-43
MILHO							
1	Irrigado	1317	119	583	333	678	158
	Sequeiro	1317	0	573	321	556	133
2	Irrigado	523	191	492	45	198	22
3	Irrigado	898	82	594	128	278	19
4	Irrigado	1175	121	740	185	389	18
	Sequeiro	1175	0	707	181	305	18
5	Irrigado	822	105	503	68	366	11
	Sequeiro	822	0	436	65	332	11

ET_{c act}: Evapotranspiração da cultura; RO: Escoamento superficial; DP: Percolação profunda; Δ ASW: Variação na ASW (Início-final).

A ET_{c act} é o principal componente de saída do balanço hídrico, sendo dependente da disponibilidade de água no solo, do estágio da cultura e da demanda evaporativa da atmosfera (ET_o). Em termos do balanço hídrico do solo, a ET_c é o segundo maior componente, sendo superado apenas pela precipitação pluvial (GLENN et al., 2007). Sempre que a ASW se encontrar abaixo da RAW, a ET_{c act} é reduzida (ROSA et al., 2012a; b), o que pode ser visualizado pelas diferenças de ET_{c act} entre as áreas irrigadas e de sequeiro (Figura 7, Figura 12, Figura 13, Figura 14 e Figura 15). Essa redução na ET_{c act} é função da ocorrência de estresse hídrico, o qual é computado pelo modelo em forma de K_s, reduzindo o K_{cb act} em função da reduzida disponibilidade hídrica no solo (ROSA et al., 2012a; b). A redução na ET_{c act} pode ser

visualizada em grande parte das áreas de sequeiro e em curtos períodos nas áreas irrigadas, (Figura 7, Figura 12, Figura 13, Figura 14 e Figura 15). Os períodos de déficit hídrico observados nas áreas irrigadas sempre precederam uma precipitação, o que indica que o produtor não irrigou, ou diminui a lâmina de irrigação, baseado na previsão de precipitações para os dias seguintes. Para a soja, a maior redução da $ET_{c\ act}$ foi observada na área 2, com um déficit acumulado $ET_{c\ act}$ de 212 mm. Menores reduções na ET_c foram observadas nas áreas 1 e 6 iguais, com apenas 10 mm de déficit. Para o milho, a maior redução da $ET_{c\ act}$ foi observada na área 5, com um déficit de 67 mm e a menor na área 1, com déficit de 10 mm.

O escoamento superficial, além de ser influenciado pelas precipitações (HAWKINS; HJELMFELT; ZEVENBERGEN, 1985) depende das características de solo, como relevo, granulometria, porosidade, cobertura e umidade no momento da precipitação (OLIVEIRA, et. al., 2013; SPOHR et al., 2009; ALLEN et al., 2007). Dessa forma, sempre que ocorrerem precipitações sobre um solo úmido, a quantidade de água perdida por escoamento será maior (ALLEN et al., 2007). Solos descobertos (OLIVEIRA, et. al., 2013), ou com camada superficial compactada, tendem a apresentar maior escoamento, bem como solos argilosos, quando comparados com solos arenosos (ALLEN et al., 2007).

Apesar de solos argilosos apresentarem maior escoamento superficial que solos arenosos (ALLEN et al., 2007), evidenciado pela calibração da CN de 70 para a área 1, de solo franco arenoso (Tabela 2) e de CN 80 para as demais áreas (solos argilosos), não se observou maior lâmina escoada nesses solos no cultivo de milho (Tabela 11). Isso se deve ao fato da menor intensidade das precipitações, observando as áreas 2, 3, 4 e 5 de milho, que com exceção da área 4, apresentaram lâmina total de precipitada de 900 mm, (\approx 400 mm menor que na área 1). Na área 4, precipitação total foi de 1175 mm; a $ET_{c\ act}$, em contrapartida, foi superior a 700. A maior extração de água na área 4 teve importante contribuição na redução das perdas por percolação, possibilitando melhor uso da água precipitada e armazenada no solo (GLENN et al., 2007; OLIVEIRA, et. al., 2013; SPOHR et al., 2009). Para as áreas de soja, a variação no escoamento superficial foi menor, no entanto, menores valores foram observados nas áreas 5 e 7 (78 e 64 mm), para precipitações de 490 e 632 mm, respectivamente. Há de se destacar que as áreas 5 e 7 foram cultivadas com soja safrinha, em sucessão ao milho, com elevada quantidade de resíduos da cultura antecessora.

O escoamento superficial foi maior nas áreas que apresentaram maior precipitação, sendo registrados os maiores valores de percolação para a área 1 (milho irrigado) e sequeiro, com 333 mm e 321 mm, respectivamente, para uma de precipitação 1317 mm. De acordo com

Spohr et al. (2009), o aumento da intensidade das chuvas e da umidade inicial do solo, reduzem o tempo de início do escoamento, resultando em maior lâmina escoada. Da mesma forma, observou-se maior escoamento nas áreas irrigadas, em relação às áreas de sequeiro, com exceção da área 1 de soja, o que pode ser atribuído a maior umidade do solo nas áreas irrigadas, favorecendo as perdas por RO (OLIVEIRA, et. al., 2013; SPOHR et al., 2009; ALLEN et al., 2007). O mesmo é observado para a DP, que foi maior nas áreas irrigadas, quando comparada com as áreas de sequeiro, sendo a percolação também dependente da umidade no solo anterior a ocorrência de precipitação ou irrigação pesada.

A DP também é dependente da lâmina precipitada, das características de solo e umidade no momento da precipitação, sendo que, toda a água que se encontra acima da capacidade de campo ou TAW será perdida por percolação, e o tempo para que essa percolação aconteça depende da condutividade hidráulica do solo, bem como do volume de água a ser percolado (LIU; PEREIRA; FERNANDO, 2006). A DP foi maior onde se teve maiores índices pluviométricos, tendo os maiores valores para soja na área 6 e milho na área 1, ambos irrigados. Na área 6 de soja irrigada, observou-se precipitação acumulada de 841 mm e DP de 273 mm, enquanto na área 1 de milho observou-se DP de 677 mm com 1317 mm de precipitações. De acordo com Liu et al. (2016), a DP é correlacionada com o volume e duração das precipitações, sendo que precipitações acima de 20 mm têm elevada contribuição no total de percolação.

As características do solo também apresentaram grande influência na quantidade de água percolada, o que vai de encontro com os parâmetros a_D e b_D , sendo o valor de a_D menor para solos arenosos, o que determina que este solo inicia o escoamento antes de um solo argiloso durante uma precipitação ou irrigação pesada. O valor de b_D foi semelhantes para todas as áreas, no entanto, observou-se valor ligeiramente menor para a área 1 (-0,022), comparado com as áreas mais argilosas (-0,02). Este menor valor de b_D , indica que o solo tem maior taxa de drenagem, ou seja, a percolação ocorre de forma mais rápida em solos arenosos quando comparado a solos argilosos (LIU; PEREIRA; FERNANDO, 2006).

A variação no armazenamento (ΔASW) corresponde à diferença na ASW no início e no final do cultivo, sendo que valores negativos indicam a quantidade de água que ficou a mais no solo ao final do ciclo, comparado ao início, enquanto valores positivos indicam a quantidade de água que foi retirada do perfil do solo ao final do ciclo, em relação à lâmina inicial. Observa-se pouca diferença entre as áreas irrigadas e de sequeiro, o que pode ser justificado do pela ocorrência de elevadas lâminas de precipitação, tanto no início como no final do período de cultivo (Figura 1 e Figura 2).

O modelo SIMDualKc, por aplicar a metodologia do K_c dual (ALLEN et al., 1998; ROSA et al., 2012), permite que a ET_{c act} possa ser dividida nos componentes evaporação da água do solo (E_s) e transpiração da planta (T_c). Nas Tabela 12 e Tabela 13 são apresentados o particionamento da ET_{c act} em E_s e T_c, para os diferentes estádios de desenvolvimento e áreas estudadas. Para a soja, observou-se que, em média, 18% da ET_{c act} resultou em E_s e 82% em T_c, enquanto que, para o milho, tem-se que aproximadamente 13% da ET_{c act} é devido a E_s, enquanto, 87% é T_c. Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Gimenez et al. (2017), que encontraram 16% e 20% de E_s em relação a ET_{c act} para a soja irrigada e sequeiro, respectivamente. A avaliação da E_s e T_c nos diferentes estádios de desenvolvimento, indica que no estágio inicial houve maior perda por E_s, sendo em média de 76% e 65% da ET_{c act}, para a soja e milho, respectivamente. Por outro lado, o estágio em que ocorreram menores perdas de água por E_s é o estágio intermediário, onde as plantas transpiraram, em média, 99 e 98% da ET_{c act}, para a soja e milho, respectivamente. Para os estádios de desenvolvimento rápido e final, a E_s representou, em média 22 e 8% da ET_{c act}, para a soja e 21 e 14% para o milho, respectivamente. Esses valores estão dentro dos padrões descritos para culturas densas como o milho (PAREDES et al., 2014a; DING et al., 2013; MARTINS et al., 2013), cevada (PEREIRA et al., 2015a), além de cultivos em rotação, como trigo de inverno e milho (ZHAO et al., 2013; ZHANG et al., 2013), e menos densas como o tomate (PAREDES et al., 2018a).

Todas as áreas utilizadas nesse estudo foram cultivadas em sistema plantio direto, caracterizada presença resíduos de culturas antecessoras (*mulch*) e ausência de revolvimento do solo, o que contribui para a diminuição na E_s. Essa redução devido a presença de *mulch* variou de 40 a 75% para a soja, de acordo com os resíduos deixados pela cultura antecessora, sendo que, quando a soja sucedeu o milho (áreas 1, 5 e 7), observou-se maiores reduções na E_s, com menor redução na área 2, a qual apresentava menor quantidade de palha. Para o milho, a diminuição na evaporação pela utilização do *mulch* variou de 10% na 2, até 50% nas áreas 3 e 4. Na área 1 houve 30% e na área 5, 35% de redução da E_s pela utilização dessa prática de manejo do solo. A E_s abaixo de um dossel ou entre plantas é estimada pela quantidade de energia que chega à superfície do solo, sendo que, quando o solo está úmido, prevê-se que a evaporação ocorra a uma taxa máxima, de acordo com a ET_o e limitado por um valor máximo de K_c (K_{c max}) (ALLEN et al., 2005b; RITCHIE, 1972; SAXTON; JOHNSON; SHAW, 1974; WRIGHT, 1982). Dessa forma, a presença de resíduos na superfície contribui para a diminuição na energia disponível para E_s, contribuindo para a manutenção da umidade na camada superficial, evaporável (Z_e) do solo.

Tabela 12 - Evaporação de água do solo (E_s , mm) e transpiração da cultura (T_c , mm) em cada estágio de desenvolvimento da cultura da soja nas áreas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, conforme modelo SIMDualKc, nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/19, no Rio Grande do Sul.

Áreas	Cultivos	Inicial		Crescimento		Intermediário		Final		Ciclo total		
		E_s	$T_{c\ act}$	E_s	$T_{c\ act}$	E_s	$T_{c\ act}$	E_s	$T_{c\ act}$	E_s	$T_{c\ act}$	
1	Irrigada	(mm)	19	10	16	67	1	167	3	32	39	277
		(%)	65	35	19	81	1	99	9	91	12	88
	Sequeiro	(mm)	13	10	15	67	1	164	3	32	32	273
		(%)	55	45	18	82	1	99	9	91	10	90
2	Irrigada	(mm)	38	7	38	114	4	359	7	46	86	524
		(%)	85	15	25	75	1	99	13	87	14	86
	Sequeiro	(mm)	38	7	30	99	4	199	5	25	76	322
		(%)	85	15	23	77	2	98	16	84	19	81
3	Irrigada	(mm)	62	20	19	68	3	184	8	72	93	348
		(%)	76	24	22	78	1	99	10	90	21	79
	Sequeiro	(mm)	57	19	16	59	3	184	7	59	83	319
		(%)	75	25	22	78	1	99	10	90	20	80
4	Irrigada	(mm)	77	19	30	122	7	233	2	112	116	486
		(%)	80	20	20	80	3	97	2	98	19	81
	Sequeiro	(mm)	77	19	26	121	5	197	2	103	110	437
		(%)	80	20	17	83	2	98	2	98	20	80
5	Irrigada	(mm)	49	12	11	66	1	180	3	62	65	321
		(%)	81	19	14	86	1	99	5	95	17	83
6	Irrigada	(mm)	52	16	44	95	2	219	5	46	103	376
		(%)	76	24	32	68	1	99	9	91	22	78
	Sequeiro	(mm)	52	16	44	95	2	210	5	46	102	367
		(%)	76	24	31	69	1	99	9	91	22	78
7	Irrigada	(mm)	35	12	11	59	1	147	2	26	49	244
		(%)	75	25	15	85	1	99	8	92	17	83

Tabela 13 - Evaporação de água do solo (E_s , mm) e transpiração da cultura ($T_{c\ act}$, mm) em cada estágio de desenvolvimento da cultura do milho irrigado e de sequeiro, nos anos agrícolas de 2017/18 e 2018/19, no Rio Grande do Sul.

Áreas	Cultivos	Inicial		Crescimento		Intermediário		Final		Ciclo total		
		E_s	$T_{c\ act}$	E_s	$T_{c\ act}$	E_s	$T_{c\ act}$	E_s	$T_{c\ act}$	E_s	$T_{c\ act}$	
1	Irigada	(mm)	67	12	31	60	10	372	1	32	108	476
		(%)	85	15	34	66	2	98	4	96	19	81
	Sequeiro	(mm)	66	12	31	60	6	365	1	33	105	469
		(%)	85	15	34	66	2	98	4	96	18	82
2	Irigada	(mm)	34	16	11	49	5	300	13	63	64	428
		(%)	68	32	19	81	2	98	17	83	13	87
3	Irigada	(mm)	34	15	16	104	4	269	17	136	72	524
		(%)	69	31	14	86	2	98	11	89	12	88
4	Irigada	(mm)	16	10	28	102	12	370	33	171	88	653
		(%)	62	38	21	79	3	97	16	84	12	88
	Sequeiro	(mm)	16	10	26	102	9	346	33	166	84	624
		(%)	62	38	20	80	3	97	17	83	12	88
5	Irigada	(mm)	10	12	12	82	8	274	21	86	51	454
		(%)	45	55	13	87	3	97	20	80	10	90
	Sequeiro	(mm)	10	12	9	62	6	239	22	78	46	391
		(%)	45	55	12	88	2	98	22	78	11	90

6.6. ESTIMATIVA DO RENDIMENTO DE GRÃOS

Na Tabela 14 é apresentado o rendimento (Y_a) e o déficit de rendimento (Y_{def}) ($Mg\ ha^{-1}$) para a soja e milho, sendo o Y_{def} , calculado pela diferença entre a área irrigada e de sequeiro.

Tabela 14 - Rendimento (Y_a) e déficit de rendimento (Y_{def}) ($Mg\ ha^{-1}$) para as áreas avaliadas de soja e milho, nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/29, no Rio Grande do Sul.

Áreas	Cultivo	Rendimento ($Mg\ ha^{-1}$)	Déficit de rendimento ($Mg\ ha^{-1}$)
SOJA			
Área 1	Irigado	3,39	0,31
	Sequeiro	3,07	
Área 2	Irigado	4,80	1,92
	Sequeiro	2,88	
Área 3	Irigado	4,74	0,12
	Sequeiro	4,62	
Área 4	Irigado	4,44	0,36
	Sequeiro	4,08	
Área 5	Irigado	2,64	
Área 6	Irigado	5,04	0,81
	Sequeiro	4,23	
Área 7	Irigado	2,58	
Média		3,88	0,71
MILHO			
Área 1	Irigado	12,40	1,40
	Sequeiro	11,00	
Área 2	Irigado	13,26	-
Área 3	Irigado	11,22	-
Área 4	Irigado	11,00	2,40
	Sequeiro	8,60	
Área 5	Irigado	12,00	3,00
	Sequeiro	9,00	
Média		11,06	2,27

Para a soja, o rendimento variou de 2,58 a 5,04 $Mg\ ha^{-1}$, com média de 3,88 $Mg\ ha^{-1}$, sendo que, os menores rendimentos foram observados para a soja safrinha, nas áreas 1, 5 e 7. A exceção foi a área 2, de sequeiro, a qual produziu 2,88 $Mg\ ha^{-1}$. Os déficits de rendimento, entre irrigado e sequeiro, foram de 0,71 $Mg\ ha^{-1}$, em média, o que representa uma redução de 18% do rendimento médio dos cultivos. A maior redução na produtividade foi observada para a área 2, de 1,92 $Mg\ ha^{-1}$.

¹, a qual representa uma diminuição de 40% no rendimento em relação a área irrigada. Por outro lado, a menor diferença foi observada na área 3, onde a redução de produtividade foi de 0,12 Mg ha⁻¹ (2,50%).

Para o milho, o rendimento variou de 8,60 a 13,26 Mg ha⁻¹, com média de 11,06 Mg ha⁻¹, sendo os menores rendimentos observados para as áreas de sequeiro (4 e 5). Os déficits de rendimento foram de 2,27 Mg ha⁻¹, em média, que representa cerca de 20% do rendimento médio dos cultivos. Comparando a média dos cultivos irrigados com a sequeiro, tem-se 11,98 e 9,53 Mg ha⁻¹, respectivamente, com diferença de 2,44 Mg ha⁻¹.

As diferenças nas reduções de rendimento podem ser explicadas pela variabilidade das precipitações (Figura 1, Figura 2, 3 e 4) e necessidade de irrigação (Anexo 1, Anexo 2 e Anexo 3). Assim, em áreas com precipitações bem distribuídas ao longo do ciclo, houve menor necessidade de irrigação, tendo menor redução no rendimento também na área de sequeiro. No entanto, não somente as precipitações influenciam na necessidade de irrigação, como também a TAW do solo, a demanda evaporativa da atmosfera (ET_o), e o estágio de desenvolvimento da cultura em que o déficit hídrico ocorreu (Figura 7, Figura 12, Figura 13, Figura 14 e Figura 15) (ALLEN et al., 1998; ROSA et al, 201 a; b; PAREDES et al., 2017) .

Na Figura 16, é apresentado o rendimento observado (Y_a) em função da transpiração atual acumulada (T_{c actual}), em função do déficit transpiratório (T_d), bem como o déficit de rendimento (Y_{def}, Mg ha⁻¹) em função do déficit transpiratório (T_d).

Em relação a Y_a em função da T_{c actual}, observa-se para a soja (Figura 16a) uma tendência no aumento do rendimento com o aumento da transpiração, no entanto, apresenta uma correlação baixa, com coeficiente de determinação R² de 0,43. Para o milho (Figura 16b), o R² foi de 0,09, indicando que a T_{c actual} não tem alta correlação com o Y_a nas condições do presente estudo. Para o Y_a em função do T_d, não se observou tendência significativa para a soja (Figura 16c) com R² de 0,08. Por outro lado, para o milho (Figura 16d), observa-se uma tendência de diminuição do rendimento com o aumento do T_d, com R² de 0,63.

Essa baixa correlação, tanto para o Y_a em função da T_{c actual} quanto do T_d, para ambas as culturas, pode ser explicada pelas condições do presente estudo, o qual utiliza dados de diferentes anos agrícolas, locais (solos e clima), cultivares, datas de semeadura e manejo, o qual depende do nível tecnológico de cada agricultor. Dessa forma, o rendimento pode variar em função de outras variáveis entre uma área e outra.

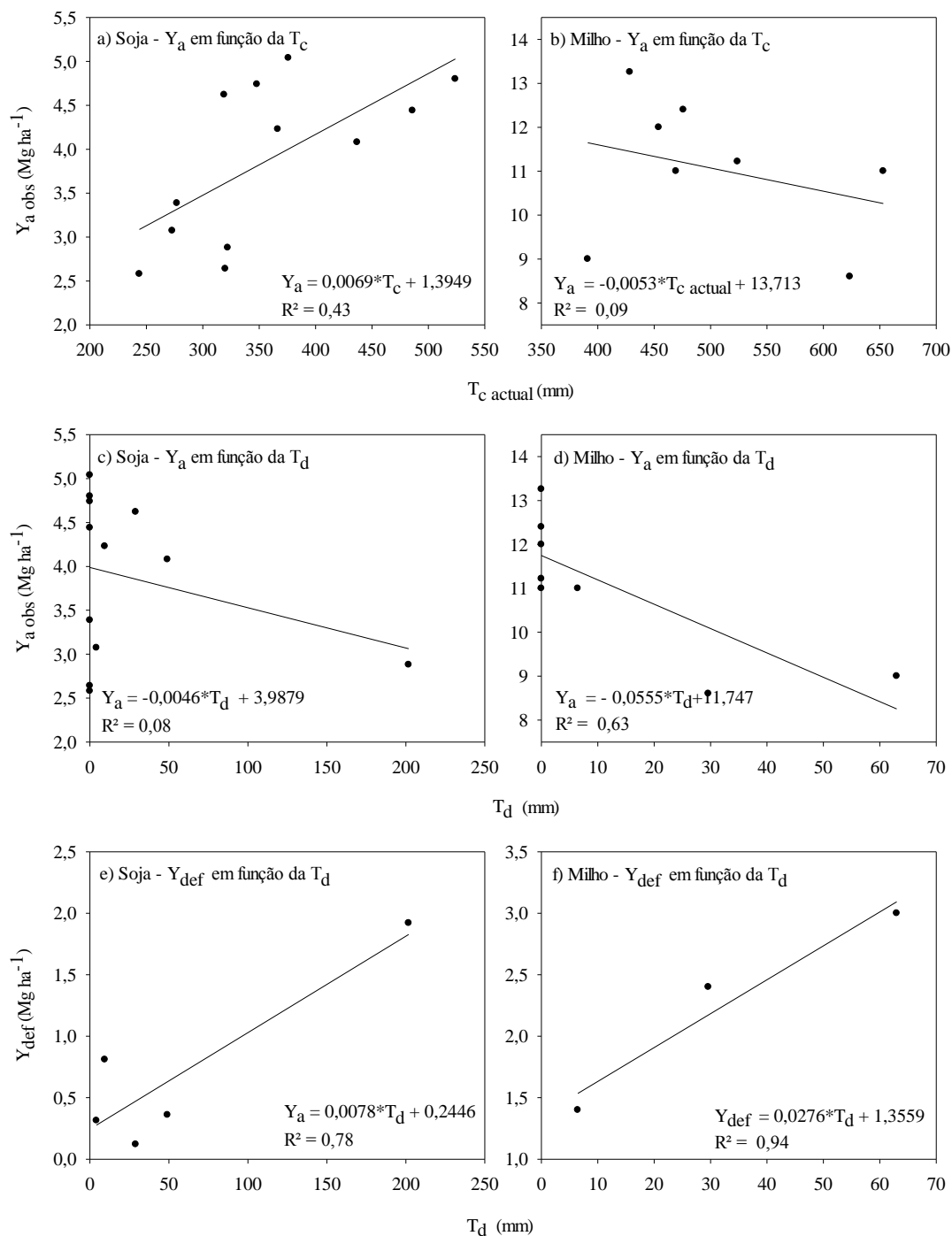


Figura 16 - Rendimento observado (Y_a , $Mg \text{ ha}^{-1}$) em função da transpiração atual ($T_c \text{ actual}$ - mm) (a e b), do déficit transpiratório (T_d - mm) (c e d), e do déficit de rendimento (Y_{def} , $Mg \text{ ha}^{-1}$) em função do déficit transpiratório (T_d - mm) (e, e f) para a soja e milho, nos anos agrícolas 2017/18 e 2018/29, no Rio Grande do Sul.

No entanto, quando o Y_{def} é isolado e relacionado com o T_d , observou-se alta correlação, com R^2 de 0,78 e 0,94 para a soja e milho, respectivamente. Para ambas as culturas, as perdas de rendimento aumentam com o incremento do Y_{def} . Para a soja, o decréscimo do rendimento foi de 7,9 Kg (0,0078 Mg) para cada milímetro de déficit transpiratório, enquanto que, para o milho, observou-se um decréscimo de 27,6 Kg (0,0276 Mg) para cada milímetro de T_d . Esses resultados sugerem que a água tem efeito limitante no rendimento das culturas, dessa forma, o Y_a , depende do potencial e das condições de cada área de cultivo, enquanto o Y_{def} é diretamente regulado pela disponibilidade de água no solo. Outros estudos também têm indicado a água como fator limitante na produtividade das culturas (VAN ITTERSUM et al., 2013; AGUS et al., 2019; GRASSINI et al., 2011).

A Figura 17 apresenta a relação entre os valores de rendimento de grãos da soja e milho observados e simulados pela abordagem SIMDualKc-Stewart nas fases S1 e S2. Para a fase S1, na cultura da soja, o valor de K_y ajustado foi de 0,95, o qual é intermediário aos valores reportados na literatura, como o de 0,85 (DOORENBOS; KASSAM, 1979), 1,05 (ROSADI et al., 2007) 1,26, (STEGMAN et al., 1990; GIMENEZ et al., 2017) e 1,30 (WEI et al., 2015).

No milho, 1,25 foi o valor de K_y ajustado, o qual está dentro dos observados por Stewart et al. (1977), os quais variam de 1,03 a 1,72. Outros estudos têm indicado valores similares para a cultura do milho, como o de 1,25 (DOORENBOS; KASSAM, 1979), 1,32 (PAREDES et al., 2014a; POPOVA; PEREIRA, 2011), 1,12 a 1,39 (RETTA; HANKS, 1980); 1,03 a 1,46 (DEHGHANISANIJ et al., 2009), 1,00 a 1,48 (POPOVA; ENEVA; PEREIRA et al., 2006), e 0,85 a 1,36 (ÇAKIR, 2004). Por outro lado, Howell, Schneider e Evett (1997) observaram um valor maior (1,47), no entanto, este estudo foi conduzido em condições de clima árido no estado do Texas (EUA). Os valores de K_y podem variar de acordo com as condições climáticas, principalmente em relação a precipitação e demanda evaporativa da atmosfera (ÇAKIR, 2004). Para o Uruguai, Giménez et al. (2016) obtiveram um valor médio de K_y de 1,42. Mesmo que em condições de clima e solo semelhantes ao sul do Brasil, Giménez et al. (2016) utilizaram um híbrido precoce, com elevada população (100 000 pl ha⁻¹), o que resulta em uma maior sensibilidade da cultura ao déficit hídrico.

Na fase 2, ajustou-se os valores de 0,8, 1,2 e 0, para a cultura da soja, e 1,2, 3,2 e 0, para o milho, para os coeficientes β_v , β_f e β_m , respectivamente. Para a cultura do milho, Stewart et al. (1977) apresentaram valores variando de 1,0 a 1,8 para β_v , 0,6 a 2,8 para β_f e 0,8 a 5,7 para β_m .

Para este trabalho, com exceção a β_v , os valores encontrados encontram-se dentro dos intervalos reportados por Stewart et al. (1977). Ainda para o cultivo do milho, valores de 1,2, 2,8 e 0,9 foram reportados por Alves, Fontes e Pereira (1991), Paredes et al. (2014a) e Giménez et al. (2016).

Quanto maior for o valor do K_y ou dos coeficientes β_v , β_f , e β_m , maior é a sensibilidade da cultura ao déficit hídrico, ou dos estádios de desenvolvimento, respectivamente (DOORENBOS; KASSAM, 1979). Para a fase S2, os valores encontrados, para ambas as culturas, indicam que o estágio mais suscetível ao déficit hídrico é a floração e que, após a maturidade fisiológica, o déficit hídrico não afeta o rendimento de grãos.

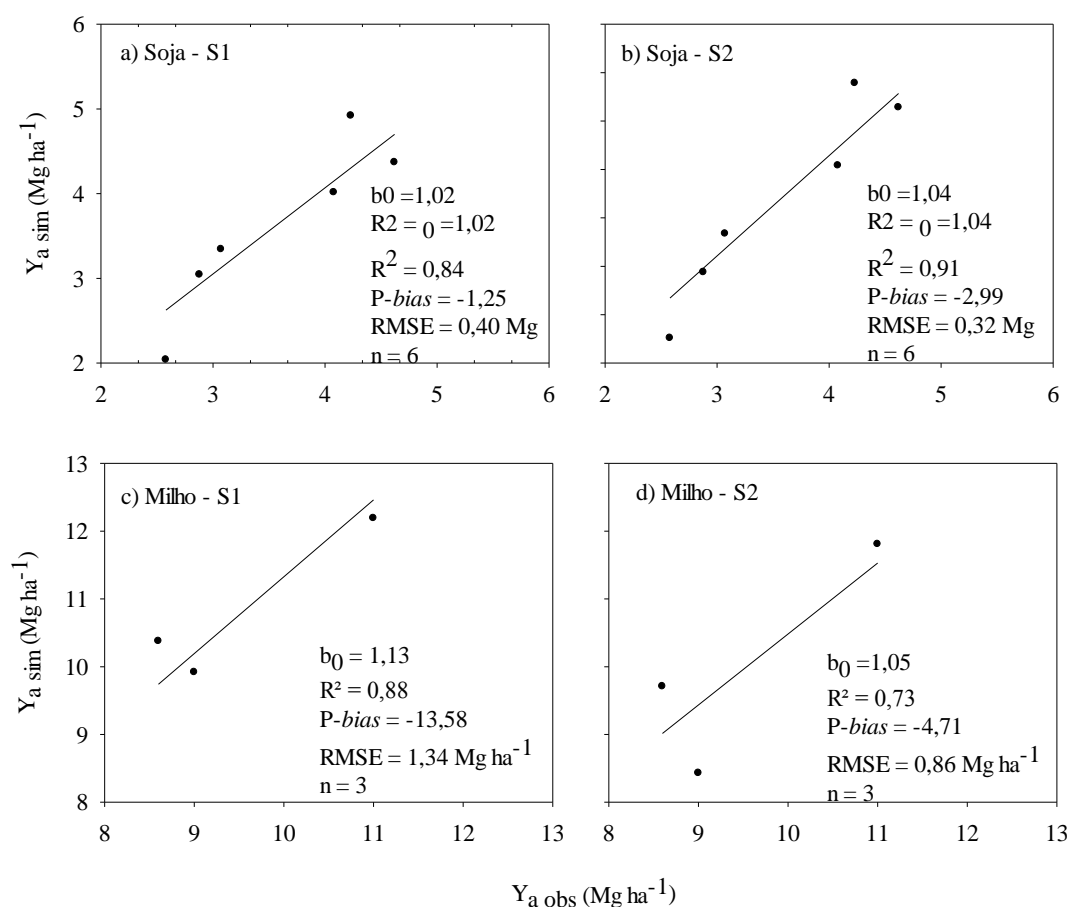


Figura 17 - Relação entre os valores de rendimento de grãos da soja (a e b) e milho (c e d) observados e simulados pela abordagem SIMDualKc-Stewart fase S1 (a e c) e S2 (b e d). Os indicadores estatísticos apresentados são o coeficiente linear (b_0) e o coeficiente de determinação (R^2), a porcentagem de viés ($P\text{-bias}$), a raiz quadrada do quadrado médio do erro (RMSE) e o número de observações (n).

Observando os indicadores estatísticos apresentados para a cultura da soja, as duas fases se apresentam adequadas para a predição do rendimento, tendo, b_0 próximo de 1, R^2 de 0,84 e 0,9, e P -bias de -1,25 e -2,99 para as fases S1 e S2, respectivamente. Observando os valores de RMSE, que variaram de 0,40 e 0,32 Mg ha⁻¹ para S1 e S2, respectivamente, a fase S2 do modelo foi levemente superior, o que é explicado por este levar em consideração o estágio em que o déficit hídrico ocorreu (PAREDES et al., 2014a; STEWART et al., 1977). Predições similares de rendimento foram obtidos em outros trabalhos como o de Wei et al. (2015), que aplicaram a fase S1 do modelo de Stewart, encontrando um RMSE de 0,38 Mg ha⁻¹, porém, utilizando a $ET_{c\ act}$ ao invés da $T_{c\ act}$. Paredes et al. (2014b), utilizando o mesmo conjunto de dados de Wei et al. (2015) encontraram um RMSE de 0,30 Mg ha⁻¹, aplicando o modelo FAO Aquacrop. Utilizando o modelo CROPGRO-soybean, Calviño, Sadras e Andrade (2013) relataram um RMSE de 0,51 Mg ha⁻¹, o que significa 18% do rendimento médio do estudo. Liu et al. (2013), também aplicando o modelo CROPGRO-soybean, encontraram um RMSE equivalente de 15 a 22% em relação ao rendimento médio. Por sua vez, Gimenez et al. (2017), observaram um RMSE de 0,65 Mg ha⁻¹ quando aplicaram o modelo SIMDualKc-Stewart (S1) e de 1,0 Mg ha⁻¹ com a utilização do modelo FAO AquaCrop. Para o presente estudo, os valores de RMSE encontrados representam entre 10 e 8% do rendimento médio observado, para S1 e S2, respectivamente.

Ainda para o cultivo da soja, analisando os rendimentos observados e estimados pelas fases S1 e S2 do modelo SIMDualKc-Stewart, ($Y_{a\ obs} - Y_{a\ sim}$), observa-se que, para a fase S1, desvios variando de -0,69 a 0,54 Mg ha⁻¹, sendo o menor desvio observado de 0,06 Mg ha⁻¹, observado na área 4. Para a fase S2 do modelo, a variação nos desvios foi de -0,66 a 0,32 Mg ha⁻¹, sendo o menor desvio de -0,02 Mg ha⁻¹, verificado na área 3. Gimenez et al. (2017), aplicando o modelo SIMDualKc-Stewart S1, encontraram desvios variando de -1,38 a 0,98 Mg ha⁻¹, para uma mesma variedade de soja em diferentes anos agrícolas e estratégias de manejo da irrigação. Nas mesmas condições, mas aplicando o modelo FAO AquaCrop, os mesmos autores observaram desvios variando de -2,16 a 1,87 Mg ha⁻¹. PAREDES et al (2015), verificaram desvios variando de 2 a 12,9% com o modelo FAO AquaCrop e de 4,7 a 19,1 com o modelo SIMDualKc-Stewart S1. Dessa forma, os modelos podem ser considerados adequados para aplicação com leve superioridade para a fase S2 em relação a S1 do modelo SIMDualKc-Stewart, o que indica que o estágio intermediário (floração) é o mais sensível ao déficit hídrico.

Para a estimativa de rendimento de grãos de milho, também se observou que a fase S2 foi capaz de representar melhor o rendimento da cultura em função do déficit transpiratório, quando comparado a fase 1, apresentando RMSE de $0,86 \text{ Mg ha}^{-1}$, mesmo apresentando um menor R^2 (0,73). Os valores de b_0 e $P\text{-bias}$, de 1,05 e - 4,71, respectivamente, indicam superestimação dos valores de rendimento pelo modelo.

A fase S1, apesar de apresentar alta correlação entre os dados observados e simulados ($R^2 = 0,88$), apresentou RMSE elevado ($1,34 \text{ Mg ha}^{-1}$). Esse fato também pode ser explicado pela utilização de apenas um valor de K_y para todas as condições climáticas do presente estudo, sendo que, cultivos em regimes pluviométricos mais abundantes tendem a apresentar uma menor resposta à disponibilidade hídrica, reduzindo o valor do K_y (ÇAKIR, 2004). A partir dos valores de b_0 e $P\text{-bias}$, é possível verificar que o modelo superestima os dados observados, ou seja, não penaliza o rendimento da maneira que deveria, que pode ser atribuído à adoção de um único coeficiente para todo o ciclo, não considerando os períodos de maior sensibilidade ao déficit hídrico.

Os valores de RMSE obtidos podem ser considerados aceitáveis. Paredes et al. (2014a), utilizando os mesmos modelos, encontraram RMSE de $1,80$ e $1,21 \text{ Mg ha}^{-1}$, para os modelos S1 e S2, respectivamente, para a cultura do milho, sob diferentes estratégias de irrigação, em três diferentes anos. Paredes et al. (2014b), utilizando o mesmo conjunto de dados de Paredes et al. (2014a), no entanto, aplicando o modelo FAO AquaCrop, observaram RMSE de $2,51$ e $1,73 \text{ Mg ha}^{-1}$, ao aplicar parâmetros padrões e calibrados, respectivamente. Em ambos os trabalhos (PAREDES et al., 2014a; PAREDES et al., 2014b), os autores utilizaram a $ET_{c \text{ act}}$ como entrada do modelo, e não a $T_{c \text{ act}}$, como no trabalho atual. Esse fato pode agregar erro às estimativas, uma vez que, a $ET_{c \text{ act}}$ engloba também a água que foi evaporada pela superfície do solo e não tem relação com a fotossíntese, acúmulo de biomassa e rendimento de grãos da cultura.

Giménez et al. (2016) aplicaram as duas fases do modelo SIMDualKc-Stewart para o cultivo do milho, obtendo valores de RMSE variando de $1,83$ (K_y calibrado) a $1,93$ (K_y padrão) Mg ha^{-1} , para a fase S1, e de $1,47$ (K_y calibrado) a $2,27$ (K_y padrão) Mg ha^{-1} , para a fase S2, respectivamente. Esse resultado demonstra que, quando calibrado de maneira apropriada, a fase S2 do modelo é capaz de gerar melhores estimativas do rendimento. No entanto, quando da não calibração dos parâmetros, recomenda-se a utilização da fase S1.

O RMSE obtido pelos modelos para o milho, representa $12,15$ e $7,76\%$ para S1 e S2, respectivamente, em relação ao rendimento médio. Esses valores, estão dentro dos encontrados

para outras culturas aplicando-se diferentes metodologias, como Calviño, Sadras e Andrade (2013) e Liu et al. (2013), que utilizaram o modelo CROPGRO-soybean, encontrando um RMSE em torno de 18% e 22%, em relação ao rendimento médio dos respectivos estudos. Em uma diferente metodologia, mas buscando a estimativa do rendimento de milho utilizando dados derivados de imagens multiespectrais, em um conjunto de cultivos de milho englobando três áreas geográficas (Rio Grande do Sul, Mato Grosso e Kansas –EUA), Schwalbert et al. (2018) obtiveram um RMSE de 0,95 Mg ha⁻¹. Campos et al. (2018) buscaram estimar o rendimento de milho e soja através de uma combinação de K_{cb} obtidos através do índice de vegetação SAVI, relacionando estes com a biomassa da cultura e considerando um índice de colheita para o cálculo do rendimento, encontraram os valores de 0,81 a 1,06 Mg ha⁻¹ e de 0,27 a 0,35 Mg ha⁻¹, para milho e soja, respectivamente. Bao et al. (2017) encontraram um RMSE variando de 0,92 a 2,03 Mg ha⁻¹ aplicando o modelo CSM-CERES-Maize para a estimativa do rendimento de milho. A comparação dos resultados do presente trabalho, com os resultados disponíveis na literatura, recomenda-se a utilização do modelo S2 para a estimativa do rendimento do milho no Rio Grande do Sul a partir da disponibilidade hídrica para a cultura.

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs o uso de uma metodologia pela qual se torna possível a avaliação do balanço hídrico e a resposta do rendimento de grãos à disponibilidade de água no solo, para as culturas da soja e milho, nas principais regiões produtoras no Rio Grande do Sul, mesmo quando não se dispõe de observações de campo, como o IAF, f_c ou o conteúdo de água no solo. Essa metodologia leva em consideração as propriedades físicas do solo, as variáveis meteorológicas, e os dados de planta estimados a partir do índice de vegetação NDVI, derivado de imagens de satélite, e as datas de semeadura e colheita da cultura.

Para tanto, calibrou-se os coeficientes de cultivo basais para a cultura da soja e do milho no Rio Grande do Sul, os quais foram de 0,10 e 0,15 para o $K_{cb\ ini}$, e 1,08 e 1,12 para $K_{cb\ med}$, respectivamente. Para o $K_{cb\ end}$, deve-se levar em consideração o momento da colheita, sendo observados valores variando de 0,4 a 0,6 para a soja e de 0,3 a 0,5 para a cultura do milho. O valor de coeficiente de depleção (p) utilizado neste trabalho, para ambas as culturas, foi de 0,40.

As duas metodologias utilizadas para a estimativa das variáveis morfológicas da cultura, seja a f_c para a soja ou o IAF para o milho, apresentaram resultados satisfatórios com RMSE de 0,02 para a estimativa da f_c na soja e 0,29 para a estimativa do IAF do milho, a partir do NDVI da cultura.

A aplicação do modelo SIMDualKc, combinado com a $f_{c\ NDVI}$ e IAF_{NDVI} , mostrou-se eficiente para a determinação do balanço hídrico do solo para as culturas de soja e milho no Rio Grande do Sul, em diferentes condições de clima, solo e cultivares/híbridos, com RMSE variando de 2,43 a 4,87 mm para a cultura da soja e de 4,75 a 6,35 mm para a cultura do milho. Assim, recomenda-se a aplicação do modelo SIMDualKc, combinado com dados estimados a partir de imagens multiespectrais visando determinar o balanço hídrico do solo. No entanto, calibrações prévias dos parâmetros de escoamento superficial e percolação profunda, para os diferentes tipos de solo, relevo e cobertura do solo são necessárias.

O rendimento da soja apresentou relação linear com o aumento da transpiração, com um R^2 relativamente baixo (0,43), indicando que as diferenças de clima, solo, cultivares e nível tecnológico de cada área de estudo devem ser levadas em consideração. O milho, por sua vez, apresentou decréscimo linear de 55% com o déficit transpiratório.

Devido as condições do estudo, o rendimento de grãos de soja e milho apresentou relação pouco significativa com a transpiração (R^2 de 0,43 e 0,09 para soja e milho, respectivamente) e com o déficit transpiratório (R^2 de 0,08 e 0,63 para soja e milho, respectivamente). No entanto, ambas as culturas apresentaram alta correlação entre o déficit de rendimento e o déficit transpiratório, com R^2 de 0,78 e 0,94. Dessa forma, na soja, o decréscimo do rendimento foi de 7,9 Kg (0,0078 Mg) para cada milímetro de déficit transpiratório, enquanto que, para o milho, observou-se decréscimo de 27,6 Kg (0,0276 Mg) para cada milímetro de T_d . Para a estimativa do rendimento, a fase S2 do modelo SIMDualKc-Stewart se mostrou mais acurada, tanto para a cultura da soja, como para o milho, com RMSE de 8,27 e de 7,76% do rendimento médio, para a soja e milho, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- ADIMASSU, Z.; ALEMU, G.; TAMENE, L. Effects of tillage and crop residue management on runoff, soil loss and crop yield in the Humid Highlands of Ethiopia. **Agricultural Systems**, v.168, p.11–18, 2019. doi: 10.1016/j.agry.2018.10.007
- AGUS et al. Yield gaps in intensive rice-maize cropping sequences in the humid tropics of Indonesia. **Field Crops Research**, v.237, p.12–22, 2019. doi: 10.1016/j.fcr.2019.04.006
- ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO, 1998, 300p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALLEN, R. G. et al. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, v.98, p. 899–920, 2011a. doi: 10.1016/j.agwat.2010.12.015
- ALLEN, R. G. et al. Evapotranspiration information reporting: II. Recommended documentation. **Agricultural Water Management**, v.98, p. 921–929, 2011b. doi: 10.1016/j.agwat.2010.12.016
- ALLEN, R. G. et al. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, v.81, p.650-662, 1989. doi: 10.2134/agronj1989.00021962008100040019x
- ALLEN, R. G. et al. Prediction Accuracy for Project wide Evapotranspiration Using Crop Coefficients and Reference Evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.131, p. 24-36, 2005a.. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(24)
- 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, 2005b. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(2)
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. **Irrigation Science**, v.28, p.17-34, 2009. doi: 10.1007/s00271-009-0182-z
- ALLEN, R. G. et al. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.133, n.4, p.380-394, 2007a. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380)
- ALLEN, R. G. et al. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.133, n.4, p.395-406, 2007b. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(395)
- ALLEN, R. G. et al. Water requirements. In: Hoffman, G. J. et al. (Eds.), **Design and operation of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASABE, 2. ed, p. 208-288, 2007c.

ASCE-EWRI. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Reston, VA: American Soc. Civil Engineers, 2005, 70p (ASCE Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration, Report 0-7844-0805-X).

ALVES, I.; FONTES, J. C.; PEREIRA, L.S. Water-yield relations for corn. In: **Planning, Operation, and Management of Irrigation Systems for Water and Energy Conservation**. Beijing: Chinese Nat. Com. ICID (Proc. Special Tech. Session), 1991. p.154–161.

BAO, Y. et al. A comparison of the performance of the CSM-CERES-Maize and EPIC models using maize variety trial data. **Agricultural Systems**, v.150, p.109–119, 2017. doi: 10.1016/j.agsy.2016.10.006

BASSO, B. et al. Procedures for initializing soil organic carbon pools in DSSAT – Century model for agricultures systems. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.1, n.75, p.1-10, 2011. doi: 10.2136/sssaj2010.0115

BASSO, B. et al. Spatial validation of crop models for precision agriculture. **Agricultural Systems**, v.68, p.97–112, 2001. doi:10.1016/s0308-521x(00)00063-9

BASTIAANSEN, W. G. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v.212-213, p.198-212, 1998. doi: 10.1016/S0022-1694(98)00253-4

BASTIAANSEN, W. G. M.; ALLI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.94, p.321–340, 2003. doi:10.1016/s0167-8809(02)00034-8

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; BOOTE, K. J. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in southern Brazil. **Field Crops Research**, v.200, p.28–37, 2017. doi: 10.1016/j.fcr.2016.10.004

BERGAMASCHI, H. et al. Maize yield and rainfall on different spatial and temporal scales in Southern Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.603-613, 2007. doi: 10.1590/S0100-204X2007000500001

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. Columbus: Pearson, 5.ed, 2016.

ÇAKIR, R. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. **Field Crops Research**, v.89, n.1, p.1 – 16, 2004. doi: 10.1016/j.fcr.2004.01.005

CALERA, A., et al. Remote Sensing for Crop Water Management: From ET Modelling to Services for the End Users. **Sensors**, v.17, p.1104-1129, 2017. doi: 10.3390/s17051104

CALVIÑO, P.; SADRAS, V.; ANDRADE, F. Quantification of environmental and management effects on the yield of late-sown soybean. **Field Crops Research**, v.83, p.67–77, 2003. doi:10.1016/s0378-4290(03)00062-5

CAMEIRA, M. R.; et al. Simulating the fate of water in field soil–crop environment. **Journal of Hydrology**, v.315, p.1–24, 2005. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.03.020

CAMPOS, I. et al. Reflectance-based crop coefficients REDUX: For operational evapotranspiration estimates in the age of high producing hybrid varieties. **Agricultural Water Management**, 187, 140–153, 2017. doi: 10.1016/j.agwat.2017.03.022

CAMPOS, I. et al. Water productivity and crop yield: A simplified remote sensing driven operational approach. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.249, p.501–511, 2018. doi: 10.1016/j.agrformet.2017.07.0187

CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; TROIS, C. The use of a meteorological station network to provide crop water requirement information for irrigation management. **IFIP Advances in Information and Communication Technology**, v.293, p.19-27, 2009.

CARLESSO, R. et al. Runoff estimation in southern Brazil based on Smith's modified model and the Curve Number method. **Agricultural Water Management**, v.98, p.1020-1026, 2011.

CATTELAN, A. J.; DALL'AGNOL, A. The rapid soybean growth in Brazil. **OCL**, v.25, n.1, 2018. doi: 10.1051/ocl/2017058

CAVERO, J. et al. Simulation of Maize Yield under Water Stress with the EPIC phase and CROPWAT Models. **Agronomy Journal**, v.92, n.4, 2000. doi: 10.2134/agronj2000.924679x

CESB - Comitê estratégico soja Brasil. Fórum Nacional de Máxima Produtividade: case campeão, região sul e nacional (safra 2017/18), 2018. Available from: <http://www.cesbrasil.org.br/case-campeao-sul-e-nacional-safra-201718/>. Accessed at: Aug. 20, 2018.

CHOI et al. An intercomparison of three remote sensing-based surface energy balance algorithms over a corn and soybean production region (Iowa, U.S.) during SMACEX 2009. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, n.2082–2097, 2009 doi: 10.1016/j.agrformet.2009.07.002

COLAIZZI, P. D. Crop evapotranspiration calculation using infrared thermometers aboard center pivots. **Agricultural Water Management**, v.187, p.173-189, 2017. doi: 10.1016/j.agwat.2017.03.016

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2017/2018. v.5, n.11 (Décimo primeiro levantamento), 2018. Available from: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra>>. Accessed at: Aug. 20, 2018.

CRUZ-BLANCO, M. et al. An innovative remote sensing based reference evapotranspiration method to support irrigation water management under semi-arid conditions. **Agricultural Water Management**, v.131, p. 135–145, 2014. doi: 10.1016/j.agwat.2013.09.017

DEGHANISANIJ, H.; NAKHJAVANI, M.M.; TAHIRI, A.Z.; ANYOJI, H. Assessment of wheat and maize water productivities and production function for cropping system decisions in arid and semiarid regions. **Irrigation and Drainage**, v.58, p.105–115, 2009. doi: 10.1002/ird.397

DE JONGE et al. Improving evapotranspiration simulations in the CERES-Maize model under limited irrigation. **Agricultural Water Management**, v.115, p.92–103, 2012. doi: 10.1016/j.agwat.2012.08.013

DING, R. et al. Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and transpiration using a modified dual crop coefficient model in irrigated maize field with ground-mulching. **Agricultural Water management**, v.127, p.85-96, 2013. doi: 10.1016/j.agwat.2013.05.018

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Guidelines for predicting crop water requirements. Roma: FAO 1977, 154p. (Irrigation and Drainage Paper, 24).

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. Roma: FAO, 1979, 193p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

DOURADO-NETO et al. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Sci. agric.**, v.5, 2000. doi: 10.1590/S0103-90162000000100031

ER-RAKI, S. et al. Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. **Agricultural Water Management**, v.87, p.41–54, 2007. doi: 10.1016/j.agwat.2006.02.004

FAOSTAT: Food and agriculture data. 2018. Available from: <<http://www.fao.org/faostat/en/>>. Accessed at: Nov. 11, 2019.

FEHR; W. R.; CAVINESS, C. E. Stages of soybean development. Iowa: Special Bulletin, n. 80, 1977.

GARRIDO-RUBIO, J et al. Remote sensing-based soil water balance for irrigation water accounting at the Spanish Iberian Peninsula. **Proc. IAHS**, v.380, p.29–35, 2018. doi: 10.5194/piahs-380-29-2018

GAVILÁN, P.; BERENGENA, J. Accuracy of the Bowen ratio-energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. **Irrigation Science**, v.25, p.127–140, 2007. doi: 10.1007/s00271-006-0040-1

GIMÉNEZ et al. Water Use and Yield of Soybean under Various Irrigation Regimes and Severe Water Stress. Application of AquaCrop and SIMDualKc Models. **Water**, v.9, n.6 p.393-411, 2017. doi: 10.3390/w9060393

GIMÉNEZ et al. Predicting Maize Transpiration, Water Use and Productivity for Developing Improved Supplemental Irrigation Schedules in Western Uruguay to Cope with Climate Variability. **Water**, v.8, p.30-52, 2016. doi: 10.3390/w8070309

GLENN, E. P. et al. Integrating Remote Sensing and Ground Methods to Estimate Evapotranspiration. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v.26, p.139–168, 2007. doi: 10.1080/07352680701402503

- GONZÁLEZ-DUGO, M.P. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. II. Application on basin scale. **Agricultural Water management**, v.125, p.92-104, 2013. doi: 10.1016/j.agwat.2013.03.024
- GORELICK, N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v.202, p.18–27, 2017. doi: 10.1016/j.rse.2017.06.031
- GRASSINI et al. High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: I. On-farm yield, yield potential, and impact of agronomic practices. **Field Crops Research**, v.120, p.142–150, 2011. doi: 10.1016/j.fcr.2010.09.012
- 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**, v.36, p.664-668, 2006. doi: 10.1590/S0103-84782006000200049
- GUPTA, H. V.; S. SOROOSHIAN.; YAPO, P.O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of hydrologic engineering*, v.4(2), p.135-143, 1999. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135)
- HANKS, R. J. Model for predicting plant yield as influenced by water use. **Agronomy Journal**, v.66, p.660-665, 1974. doi: 10.2134/agronj1974.00021962006600050017x
- HARGREAVES, G.H.; SAMANI. Z. A. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v.1, n.2, p.96–99, 1985. doi: 10.13031/2013.26773
- HAWKINS, R. H.; HJELMFELT, A. T.; ZEVENBERGEN, A. W. Runoff Probability, Storm Depth, and Curve Numbers. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.111, p.330–340, 1985. doi:10.1061/(asce)0733-9437(1985)111:4(330)
- HSIAO, T. C. et al. AquaCrop - The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize. **Agronomy Journal**, v.101, n.3, p.448-459, 2009. doi: 10.2134/agronj2008.0218s
- HOWELL, T.A.; SCHNEIDER, A.D.; EVETT, S.R. Surface and subsurface micro irrigation of corn Southern High Plains. **Trans. ASAE**, v.40,0 p.635–641, 1997.
- JAYANTHI, H.; NEALE, C. M. U.; WRIGHT, J. L. Development and validation of canopy reflectance-based crop coefficient for potato. **Agricultural Water Management**, v.88, p.235–246, 2007. doi: 10.1016/j.agwat.2006.10.020
- JENSEN, M. E.; HAISE, H. R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division-ASCE*, v. 4, n. 1, p. 15-41, 1963.
- JENSEN, M. E. Water consumption by agricultural plants. In: T. T. Kozlowski (Ed.), **Water Deficit and Plant Growth**. New York, NY: Academic Press, 1968.

- JIANG L.; ISLAM, S. Estimation of surface evaporation map over southern Great Plains using remote sensing data. **Water resources research**, v.37, n.2, p.329-340, 2001. doi: 10.1029/2000WR900255
- JONES, C.A., KINIRY, J.R. (Eds.). **CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development**. Texas: Texas A&M University Press, College Station, 1986. p.208
- KOOL, D. et al. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. **Agricultural and Forest Meteorology**, 184, 56–70, 2014. doi: 10.1016/j.agrformet.2013.09.003
- LE PAGE, M. et al. A Life-Size and Near Real-Time Test of Irrigation Scheduling with a Sentinel-2 Like Time Series (SPOT4-Take5) in Morocco. **Remote Sensing**, v.6, p.11182–11203, 2014. doi:10.3390/rs6111182
- LIU, Y.; PEREIRA, L. S.; FERNANDO, R. M. 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. doi: 10.1016/j.agwat.2006.01.018
- Liu, S. et al. Modelling crop yield, soil water content and soil temperature for a soybean–maize rotation under conventional and conservation tillage systems in Northeast China. **Agricultural Water Management**, 123, 32–44, 2013. doi: 10.1016/j.agwat.2013.03.001
- LIU, X., et al. The response of soil water and deep percolation under *Caragana microphylla* to rainfall in the Horqin Sand Land, northern China. **CATENA**, v.139, p.82–91, 2016. doi: 10.1016/j.catena.2015.12.006
- MAKKINK, G. F. Testing the Penman formula by means of lysimeters. **Journal of the Institution of Water Engineers**, v.11, n.3, p.277-288, 1957.
- MARTINS, J. D. et al. Levantamento da área irrigada por pivô central no estado do Rio Grande do Sul. **Irriga**, v.21, n.2, p.300-311, 2016.
- MARTINS, J. D. et al. Dual crop coefficients for maize in southern Brazil: model testing for sprinkler and drip irrigation and mulched soil. **Biosystems Engineering**, v.115, p.291-310, 2013. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2013.03.016
- MATEOS, L. et al. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. I. Method validation. **Agricultural Water management**, v.15, p.81-91, 2013. doi: 10.1016/j.agwat.2012.11.005
- MICHELON, C. J. **Pedofunções para retenção de água de solos do Rio grande do Sul irrigados por aspersão**. 2010. 111 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2010.
- MORIASI et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v.50, n.3, p.885-900, 2007.

- NEALE, C. M. U. et al. Soil water content estimation using a remote sensing based hybrid evapotranspiration modeling approach. **Advances in Water Resources**, v.50, p.152–161, 2012. doi: 10.1016/j.advwatres.2012.10.008
- NORMAN, J. M. et al. Algorithms for extracting information from remote thermal-IR observations of the earth's surface. **Remote Sensing of Environment**, v.51, n.1, p.157-168, 1995. doi: 10.1016/0034-4257(94)00072-U
- OLIVEIRA, Z. B. et al. Modelagem do escoamento superficial a partir das características físicas de alguns solos do Uruguai. **Irriga**, v.18, p.415-425, 2013.
- ORTEGA-FARIÁS, S. et al. Estimation of Energy Balance Components over a Drip-Irrigated Olive Orchard Using Thermal and Multispectral Cameras Placed on a Helicopter-Based Unmanned Aerial Vehicle (UAV). **Remote Sensing**, v.8, p.638-656, 2016. doi:10.3390/rs8080638
- PAÇO, T. A. et al. The dual crop coefficient approach using a density factor to simulate the evapotranspiration of a peach orchard: SIMDualKc model versus eddy covariance measurements. **Irrigation Science**, v.30, p.115-126, 2012. doi: 10.1007/s00271-011-0267-3
- 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. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.075
- PAÇO, T A. et al. Crop Coefficients and Transpiration of a Super Intensive Arbequina Olive Orchard using the Dual Kc Approach and the Kcb Computation with the Fraction of Ground Cover and Height. **Water**, v.11, p.383, 2019. doi: 10.3390/w11020383
- 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, 2014a. doi: 10.1016/j.agwat.2013.12.010
- PAREDES, P. et al. Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. **Agricultural Water Management**, v.144, p.81–97, 2014b. doi: 10.1016/j.agwat.2014.06.002
- PAREDES, P. et al. Assessing yield, water productivity and farm economic returns of malt barley as influenced by the sowing dates and supplemental irrigation. **Agricultural Water Management**, v.179, p.132–143, 2017. doi: 10.1016/j.agwat.2016.05.033
- 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, 2018a. doi: 10.1016/j.agwat.2017.09.011
- 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, n.5 p.558-578, 2018b. doi: 10.3390/w10050558

- PAYERO, J. O.; IRMAK, S. Daily energy fluxes, evapotranspiration and crop coefficient of soybean. **Agricultural Water Management**, v.129, p.31-43, 2013. doi: 10.1016/j.agwat.2013.06.018
- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London*, v.193, n.1032, p.120-145, 1948. doi: 10.1098/rspa.1948.0037
- 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. doi 10.1016/j.agwat.2011.08.022
- 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, 2015a. doi: 10.1016/j.agwat.2015.06.006
- PEREIRA, L. S. et al. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, v.147, p.4–20, 2015b. doi: 10.1016/j.agwat.2014.07.031
- POÇAS, 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, 2015a. doi: 10.3390/rs70302373
- POÇAS, I. et al. Predicting Grapevine Water Status Based on Hyperspectral Reflectance Vegetation Indices. **Remote Sensing**, v.7, p.16460-16479, 2015b. doi: 10.3390/rs71215835
- POÇAS, I. et al. Satellite-based evapotranspiration of a super-intensive olive orchard: Application of METRIC algorithms. **Biosystems Engineering**, v.128, p.69-81, 2014. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2014.06.019
- POPOVA, Z.; PEREIRA, L.S. Modelling for maize irrigation scheduling using longterm experimental data from Plovdiv region, Bulgaria. **Agricultural Water Management**, v.98, p.675–683, 2011. doi: 10.1016/j.agwat.2010.11.009
- POPOVA, Z.; ENEVA, S.; PEREIRA, L.S. Model validation, crop coefficients and yield response factors for maize irrigation scheduling based on long-term experiments. **Biosystem Engineering**, v.95, p.139–149, 2006. doi: 0.1016/j.biosystemseng.2006.05.013
- PORTARIA Nº 119. Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura de milho 1ª safra no Estado do Rio Grande do Sul, ano-safra 2018/2019. MAPA (Ministério Da Agricultura, Pecuária e Abastecimento), 2018.
- PORTARIA Nº 154. Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura de soja no Estado do Rio Grande do Sul, ano-safra 2018/2019. MAPA (Ministério Da Agricultura, Pecuária e Abastecimento), 2018.
- PRASAD, A. K. et al. Crop yield estimation model for Iowa using remote sensing and surface parameters. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.8, p.26-33, 2006. doi: 10.1016/j.jag.2005.06.002

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. **Monthly Weather Review**, v.100, n.2 p.81-92, 1972. doi: 10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2

RETTA, A.; HANKS, R.J. Corn and alfalfa production as influenced by limited irrigation. **Irrigation Science**, v.1, p.135–147, 1980

RICHETTI et al. Remotely sensed vegetation index and LAI for parameter determination of the CSM-CROPGRO-Soybean model when in situ data are not available. **Int J Appl Earth Obs Geoinformation**, v.79, p.110-115, 2019.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. How a corn plant develops. Iowa: Special Bulletin, n. 48. 1993.

RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a crop with incomplete cover. **Water Resour. Res.**, v.8, p.1204–1213, 1972. doi: 10.1029/WR008i005p01204

RODRIGUES, G. C et al. Modelling economic impacts of deficit irrigated maize in Brazil with consideration of different rainfall regimes. **Biosystems Engineering**, v.116, p.97-110, 2013. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2013.07.001

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, 2012a. doi: 10.1016/j.agwat.2011.10.013

ROSA, R. D. et al. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 2. Model testing. **Agricultural Water Management**, v.103, p. 62–67, 2012b. doi: 10.1016/j.agwat.2011.10.018

ROSADI, R.A. et al. The effects of water stress in regulated deficit irrigation on soybean yield (*Glycine max* [L.] Merr.). **Paddy Water Environ.**, v.5, p.163–169, 2007

SANGOI et al. **Ecofisiologia da cultura do milho para altos rendimentos**. Lages: Graphel, 2010. 87p.

SAXTON, K. E.; JOHNSON, H. P.; SHAW, R. H. Modeling evapotranspiration and soil moisture. **Trans. ASAE**, v.17, p.673–677, 1974. doi: 10.13031/2013.36935

SCHWALBERT, R. A. et al. Forecasting maize yield at field scale based on high-resolution satellite imagery. **Biosystems Engineering**, v.171, p.179–192, 2018. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2018.04.020

SETIYONO, T. D. et al. Simulation of soybean growth and yield in near-optimal growth conditions. **Field Crops Research**, v.119, p.161–174, 2010. doi: 10.1016/j.fcr.2010.07.007

SIQUEIRA J.M. et al. Generating fuzzy rules by learning from olive tree transpiration measurement - An algorithm to automatize Granier sap flow data analysis. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.101, p.1–10, 2014. doi: 10.1016/j.compag.2013.11.013

SOIL SURVEY STAFF. **Soil Survey Laboratory Information Manual**: soil survey investigations report No. 45, USDA-NRCS 2.ed. 2011.

SOYSTAT. A reference guide to soybean facts and figures. American Soybean Association. 2019.

SPOHR, R. B. et al. Modelagem do escoamento superficial a partir das características físicas de alguns solos do Uruguai. **Ciência Rural**, v.39, p.74-81, 2009. doi: 10.1590/S0103-84782009000100012

STEGMAN, E.C.; SCHATZ, B.G.; GARDNER, J.C. Yield sensitivities of short season soybeans to irrigation management. **Irrigation Science**, v.11, p.111–119, 1990. doi: 10.1007/bf00188447

STEWART, J. I. Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil. Logan: Utah Water Research Laboratory, 1977, 191p (Report Paper 67).

STICKLER, F. C.; WEARDEN, S.; PAULI, A. W. Leaf Area Determination in Grain Sorghum. **Agronomy Journal**, v.53, p.187, 1961. doi: 10.2134/agronj1961.00021962005300030

TANNER, C. B.; PELTON, W. L. Potential evapotranspiration estimates by the approximate energy balance method of Penman. **Journal of Geophysical Research**, v.65, n.10, p.3391–3413, 1960. doi:10.1029/jz065i010p03391

TEIXEIRA, P.C. **Manual de Métodos de Análise de Solo**, Brasília: EMBRAPA, 3.ed, 2017.

TODD, R W. et al. Soil temperature and water evaporation of small steel and plastic lysimeters replaced daily. **Soil Science**, v.165, p. 890-895, 2000. doi: 10.1097/00010694-200011000-00007

THOMAS, A. L.; COSTA, J. A. Desenvolvimento da planta de soja e o potencial de rendimento de grãos. In: _____ **Soja**: manejo para alta produtividade de grãos. Porto Alegre: Evangraf, 2010. 248p.

USDA - United States Department of Agriculture. World Agriculture Production. 2018.

VAN BENTHEM, L. **Soybean and maize production in brazil: production processes & profitability comparisons between transgenic and conventional varieties in Mato Grosso and Paraná**. Piracicaba, SP, 75p. (Mestrado em Gestão, Economia e Consumo). Universidade de São Paulo, 2013.

VAN GENUCHTEN, M. T. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils I. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-898, 1980. doi:10.2136/sssaj1980.0361599500440005000

VAN ITTERSUM et al. Yield gap analysis with local to global relevance—A review. **Field Crops Research**, v.143, p.4–17, 2013. doi: 10.1016/j.fcr.2012.09.009

WEI, Z. et al. Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of soybean in North China Plain. **Agricultural Water Management**. v.147, p.43-53, 2015. doi: 10.1016/j.agwat.2014.05.004

WRIGHT, J. L. New evapotranspiration crop coefficients. **J. Irrig. Drain. Div. ASCE**, v.108, p.57-74, 1982.

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. doi: 10.1016/j.agwat.2011.07.009

ZHANG, B. et al. The dual crop coefficient approach to estimate and partitioning evapotranspiration of the winter wheat–summer maize crop sequence in North China Plain. **Irrigation Science**, v.31, n.6, p.1303-1316, 2013. doi: 10.1007/s00271-013-0405-1

ZHAO, 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. doi: 10.1016/j.agwat.2012.11.008

ZIPPER, S. C.; QIU, J.; KUCHARIK, C. J. Drought effects on US maize and soybean production: spatiotemporal patterns and historical changes. **Environmental Research Letters**, v.11, 094021, 2016. doi:10.1088/1748-9326/11/9/094021

ANEXOS

Anexo 1. Datas e lâminas das irrigações realizadas no cultivo da soja, nas áreas de estudo. Ano agrícola 2017/18, Rio Grande do Sul.

Área 2		Área 3		Área 4		Área 5	
Data	Lâmina (mm)	Data	Lâmina (mm)	Data	Lâmina (mm)	Data	Lâmina (mm)
24/11/2017	13,00	10/12/2017	9,410	15/12/2017	12,25	13/01/2018	9,75
11/12/2017	12,80	08/01/2018	14,80	02/01/2018	12,25	07/02/2018	12,00
14/12/2017	12,80	11/01/2018	14,80	07/01/2018	9,75	16/02/2018	11,25
15/12/2017	13,25	14/01/2018	8,50	08/01/2018	9,75	02/03/2018	14,50
23/12/2017	12,80	02/03/2018	14,80	09/01/2018	9,75	11/03/2018	11,80
30/12/2017	12,25	10/03/2018	14,80	11/01/2018	9,75	12/03/2018	11,25
31/12/2017	12,80			07/02/2018	7,25	12/04/2018	11,80
03/01/2018	9,25			08/02/2018	7,25		
06/01/2018	11,00			09/02/2018	7,25		
07/01/2018	11,00			10/02/2018	7,25		
09/01/2018	11,00			16/02/2018	5,50		
02/02/2018	11,25						
03/02/2018	11,25						
04/02/2018	12,80						
06/02/2018	12,80						
07/02/2018	14,0						
09/02/2018	12,80						
16/02/2018	15,50						
18/02/2018	12,80						
27/02/2018	12,80						
28/02/2018	13,50						
05/03/2018	12,80						
08/03/2018	14,25						
Total	288,50		77,11		98,00		82,35

Anexo 2. Datas e lâminas das irrigações no cultivo da soja, nas áreas de estudo. Ano agrícola 2018/19, Rio Grande do Sul

Área 1		Área 6		Área 7	
Data	Lâmina (mm)	Data	Lâmina (mm)	Data	Lâmina (mm)
27/01/2019	10,00	28/12/2018	6,00	01/02/2019	12,25
08/02/2019	8,20	03/02/2019	14,300	04/02/2019	10,72
05/03/2019	14,47	07/02/2019	14,30	08/02/2019	10,72
31/03/2019	11,40			27/03/2019	11,20
				30/03/2019	10,25
Total	44,07		34,60		55,14

Anexo 3. Datas e lâminas das irrigações no cultivo do milho, nas áreas de estudo. Anos agrícolas 2017/18 e 2018/19, Rio Grande do Sul.

Área 1		Área 2		Área 3		Área 4		Área 5	
Data	Lâmina (mm)	Data	Lâmina (mm)	Data	Lâmina (mm)	Data	Lâmina (mm)	Data	Lâmina (mm)
10/09/2018	7,20	02/12/2017	13,70	23/08/2017	5,25	17/08/2018	7,50	26/11/2018	3,50
17/10/2018	12,20	06/12/2017	6,08	10/09/2017	8,25	11/09/2018	8,26	05/12/2018	8,04
23/10/2018	14,55	09/12/2017	6,08	15/11/2017	13,70	29/09/2018	3,75	08/12/2018	13,24
26/10/2018	12,20	10/12/2017	13,70	23/11/2017	13,70	22/10/2018	12,80	10/12/2018	6,50
08/11/2018	12,20	11/12/2017	6,08	02/12/2017	13,70	25/10/2018	12,80	12/12/2018	8,50
10/11/2018	12,20	12/12/2017	13,70	10/12/2017	13,70	07/11/2018	12,80	15/12/2018	11,25
12/11/2018	12,20	14/12/2017	7,76	12/12/2017	13,70	09/11/2018	12,80	30/12/2018	14,25
07/12/2018	12,20	07/01/2018	7,76			11/11/2018	12,80	29/01/2019	13,20
09/12/2018	12,20	10/01/2018	7,76			05/12/2018	12,80	05/02/2019	13,20
11/12/2018	12,20	02/02/2018	12,00			07/12/2018	12,00	08/02/2019	13,20
		04/02/2018	12,00			09/12/2018	12,55		
		06/02/2018	12,00						
		07/02/2018	12,00						
		08/02/2018	12,00						
		04/03/2018	12,00						
		06/03/2018	12,00						
		09/03/2018	12,00						
		12/03/2018	12,00						
Total	119,35		190,62		82,00		120,86		104,88

Anexo 5. NDVI e fração de cobertura estimada (f_c NDVI) para o cultivo da soja, nas áreas de estudo. Ano agrícola 2018/19, Rio Grande do Sul

Área 1			Área 6			Área 7		
Data	NDVI	f_c NDVI	Data	NDVI	f_c NDVI	Data	NDVI	f_c NDVI
28/01/2019	0,313	0,03	04/12/2018	0,284	0,08	05/02/2019	0,213	0,02
07/02/2019	0,392	0,09	07/12/2018	0,281	0,08	02/03/2019	0,473	0,29
17/02/2019	0,441	0,16	24/12/2018	0,349	0,11	22/03/2019	0,644	0,84
22/02/2019	0,503	0,25	27/12/2018	0,387	0,22	27/03/2019	0,788	1,00
27/02/2019	0,529	0,33	29/12/2018	0,447	0,29	01/04/2019	0,789	1,00
04/03/2019	0,620	0,48	11/01/2019	0,600	0,46	01/05/2019	0,706	0,93
14/03/2019	0,770	0,82	26/01/2019	0,842	0,80			
24/03/2019	0,804	0,97	28/01/2019	0,838	0,91			
08/04/2019	0,799	1,00	31/01/2019	0,829	1,00			
			02/02/2019	0,820	1,00			
			07/02/2019	0,833	1,00			
			22/02/2019	0,818	1,00			
			27/02/2019	0,811	1,00			
			02/03/2019	0,802	1,00			
			04/03/2019	0,782	1,00			
			14/03/2019	0,649	0,84			
			24/03/2019	0,297	0,60			
			27/03/2019	0,283	0,58			
			29/03/2019	0,231	0,50			
			01/04/2019	0,216	0,48			

Anexo 6. NDVI e IAF_{NDVI} estimado para o cultivo do milho, nas áreas de estudo. Anos agrícolas 2017/18 e 2018/19, Rio Grande do Sul

Área 2			Área 3			Área 4			Área 5		
Data	NDVI	IAF _{NDVI}	Data	NDVI	IAF _{NDVI}	Data	NDVI	IAF _{NDVI}	Data	NDVI	IAF _{NDVI}
27/12/2017	0,540	1,82	18/09/2017	0,440	0,10	28/09/2018	0,510	1,29	07/12/2018	0,600	2,75
03/01/2018	0,750	5,26	03/10/2017	0,670	3,94	08/10/2018	0,590	2,50	17/12/2018	0,740	5,03
08/01/2018	0,760	5,42	23/10/2017	0,770	5,52	28/10/2018	0,760	5,32	27/12/2018	0,800	6,07
31/01/2018	0,870	7,14	12/11/2017	0,740	5,04	02/11/2018	0,760	5,32	11/01/2019	0,810	6,17
15/02/2018	0,870	7,14	22/11/2017	0,740	5,04	22/11/2018	0,760	5,32	21/01/2019	0,760	5,34
22/02/2018	0,860	6,99	12/12/2017	0,680	4,12	02/12/2018	0,760	5,39	31/01/2019	0,760	5,34
25/02/2018	0,840	6,65	27/12/2017	0,490	0,93	07/12/2018	0,740	5,06	02/03/2019	0,650	3,56
09/03/2018	0,790	5,82				17/12/2018	0,700	4,45	07/03/2019	0,560	2,12
17/03/2018	0,680	4,03				27/12/2018	0,650	3,54			
						01/01/2019	0,520	1,47			

Anexo 7. NDVI e IAF_{NDVI} estimado para o cultivo do milho, na área 1. Ano agrícola 2018/19, Rio Grande do Sul

Área 1 irrigada			Área 1 Sequeiro		
Data	NDVI	IAF _{NDVI}	Data	NDVI	IAF _{NDVI}
06/08/2018	0,420	0,05	06/08/2018	0,380	0,00
26/08/2018	0,430	0,29	26/08/2018	0,390	0,00
05/09/2018	0,440	0,43	05/09/2018	0,410	0,00
25/10/2018	0,640	4,32	25/10/2018	0,700	4,40
30/10/2018	0,670	5,48	30/10/2018	0,770	5,57
09/11/2018	0,730	5,87	09/11/2018	0,790	5,83
19/11/2018	0,750	5,70	19/11/2018	0,770	5,67
29/11/2018	0,730	4,39	29/11/2018	0,680	4,05
04/12/2018	0,720	4,07	04/12/2018	0,670	3,84
24/12/2018	0,670	2,50	24/12/2018	0,560	2,03
29/12/2018	0,670	2,34	29/12/2018	0,540	1,82
13/01/2019	0,600	0,05	13/01/2019	0,380	0,00