

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

**Ticiana Françaos Magalhães**

**MODELAGEM DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E PREDIÇÕES DO  
RENDIMENTO DE SOJA SOB CONDIÇÃO IRRIGADA E DE  
SEQUEIRO**

Santa Maria, RS  
2022

**Ticiana Françaos Magalhães**

**MODELAGEM DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E PREDIÇÕES DO RENDIMENTO  
DE SOJA SOB CONDIÇÃO IRRIGADA E DE SEQUEIRO**

Tese 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 **Doutor em Engenharia Agrícola**.

Orientador: Prof. Dra. Mirta Teresinha Petry

Santa Maria, RS  
2022

Magalhães, Ticiano Françoio  
MODELAGEM DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E PREDIÇÕES DO  
RENDIMENTO DE SOJA SOB CONDIÇÃO IRRIGADA E DE SEQUEIRO  
/ Ticiano Françoio Magalhães.- 2022.  
82 p.; 30 cm

Orientadora: Mirta Teresinha Petry  
Coorientador: Juliano Dalcin Martins  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2022

1. Soja 2. manejo de irrigação 3. evapotranspiração da  
cultura 4. coeficientes de cultivo I. Petry, Mirta  
Teresinha II. Martins, Juliano Dalcin III. 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, TICIANA FRANÇOIS MAGALHÃES, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) 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.

**Ticiania Françaos Magalhães**

**MODELAGEM DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E PREDIÇÕES DO RENDIMENTO  
DE SOJA SOB CONDIÇÃO IRRIGADA E DE SEQUEIRO**

Tese 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 **Doutor em Engenharia Agrícola**.

**Aprovado em 10 de outubro de 2022:**

---

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

---

**Juliano Dalcin Martins, Dr. (UFSM)**  
(Co-orientador)

---

**Zanandra Boff de Oliveira, Dra. (UFSM)**

---

**Alberto Eduardo Knies, Dr. (UERGS)**

---

**Dolores Wolschick, Dra. (IFSC)**

---

**Robson Giacomeli, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2022

## DEDICATÓRIA

*Dedico esse trabalho a minha família, em especial aos meus Pais, Ademir e Carminha, que sempre me incentivaram ao estudo. Ao meu esposo João Paulo e meus filhos Alice e Vitório por todo amor e apoio recebidos durante o caminho dessa jornada.*

*Amo vocês!*

*Dedico e ofereço.*

## AGRADECIMENTOS

*Eis que chegou o momento de agradecer a todas as pessoas que de alguma forma ou outra, contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional durante esses anos de muito aprendizado.*

*A minha orientadora professora Dra Mirta Teresinha Petry e meu co-orientador Professor Dr Juliano Dalcin Martins, pelo exemplo de profissionalismo, orientações recebidas e ensinamentos que muito me auxiliaram ao longo de todos esses anos. Pela paciência, amizade e parceria, que ultrapassa as barreiras da sala de aula, chega ao campo e permanece com os anos e a distância.*

*Aos colegas do Grupo de Pesquisa e aos bolsistas do laboratório do Sistema Irriga pela amizade e por todo apoio prestado durante o desenvolvimento do trabalho e auxílio na condução dos experimentos, muito obrigado pela amizade e por toda a ajuda para que obtivéssemos êxito na conclusão dessa etapa.*

*A minha “equipe dos bastidores” de Santana do Livramento, que cuidava da minha família e da minha casa para que eu pudesse ir a Santa Maria atingir esse objetivo. Sem vocês não seria possível!*

*A todas amigas que me acolheram em suas casas nesses anos em Santa Maria, Caroline Huth, Simone Gripa Minuzzi e Nubia Pentiado Ayres, vivemos bons momentos nesses anos.*

*À comissão examinadora, Mirta Teresinha Petry, Juliano Dalcin Martins, Zanandra Boff de Oliveira, Alberto E. Knies, Dolores Wolschick e Robson Giacomeli, pelas contribuições no trabalho.*

*À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola representados pelos professores e funcionários que nestas se dedicam ao ensino e trabalham para a formação de profissionais.*

*A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização do meu trabalho, e não estão citados.*

*A todos meu sincero **MUITO OBRIGADA!***

## RESUMO

### MODELAGEM DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E PREDIÇÕES DO RENDIMENTO DE SOJA SOB CONDIÇÃO IRRIGADA E DE SEQUEIRO

AUTORA: Ticiane Françoise Magalhães

ORIENTADORA: Mirta Teresinha Petry

O entendimento dos impactos da redução na disponibilidade de água no solo no rendimento da soja é de fundamental importância na agricultura de sequeiro e irrigada, sobretudo sob as perspectivas de alterações climáticas. A combinação de experimentos de campo com modelos de balanço hídrico pode explicar melhor o efeito das diferentes condições agroecológicas no rendimento e dar suporte às decisões de manejo que ajudem a mitigar os efeitos do déficit hídrico através do ajuste dos fatores de produção, especialmente o de manejo da irrigação. Melhorar o manejo da irrigação implica em melhorar as estimativas da evapotranspiração das culturas ( $ET_c$ ), que passa também por uma predição mais acurada dos coeficientes de cultura ( $K_c$ ) ao longo do ciclo. Uma abordagem recentemente desenvolvida por Allen e Pereira (2009) (A&P) estima os coeficientes de cultura simples ( $K_c$ ) e basal ( $K_{cb}$ ) a partir de observações da fração de cobertura do solo pela cultura ( $f_c$ ) e altura da planta ( $h$ ), uma vez que, esses parâmetros representam a base física da vegetação, como a quantidade, tipo, a resistência e condutância estomatal. Neste estudo, esta abordagem foi testada, junto com o modelo de balanço hídrico do solo SIMDual $K_c$  que foi calibrado e validado usando as observações do conteúdo de água no solo para avaliar o uso de água pela cultura da soja e a evapotranspiração atual da cultura de quatro grupos de maturidade relativa (GMR), sob condição irrigada e de sequeiro. Os experimentos de campo foram conduzidos no Rio Grande do Sul, entre 2018 e 2020. Os dados coletados permitiram estimar o  $K_c$  e  $K_{cb}$  reais para cada segmento da curva FAO usando a abordagem A&P, e estimar e particionar a ação da  $ET_c$  da soja em evaporação do solo ( $E_s$ ) e na transpiração da cultura ( $T_c$ ). O modelo SIMDual $K_c$  foi capaz de simular a variação da água disponível no solo (ASW), com um coeficiente de determinação,  $R^2$ , que variou de 0,85 a 0,98 e com coeficiente de regressão  $0,97 < b_0 < 1,03$ , durante os diferentes estádios de crescimento das plantas, até a colheita para todos os GMR avaliados. Os erros de estimativa foram baixos, com a raiz quadrada do erro médio (RMSE) variando de 3,5 a 4,3% do total de água disponível (TAW). Os  $K_c$  e  $K_{cb}$  reais estimados com ambas as abordagens foram comparados mostrando a boa precisão da abordagem A&P para aprimorar a programação de irrigação da soja. Os tratamentos sob sequeiro apresentaram redução média na produtividade de 8% em 2018/19 e 14,8% em 2019/20. Para a relação entre a produtividade de grãos de soja observada e estimada pelo modelo de regressão linear o  $b_0$  ficou entre 1,0 e 1,02, o que indica que a produtividade estimada correspondeu bem às observações no campo, apresentando uma boa associação. Os maiores valores de  $K_y$  foram obtidos para as cultivares de soja de GMR 5 e 5,5, o que demonstra que especial atenção deve ser dada no manejo da água às cultivares de menor GMR.

**Palavras-chave:** altura de plantas, déficit hídrico, fração de cobertura do solo, grupo de maturidade relativa, produtividade.

## ABSTRACT

### EVAPOTRANSPIRATION MODELING AND YIELD PREDICTIONS OF SOYBEAN UNDER IRRIGATED AND RAINFED CONDITIONS IN SOUTHERN BRAZIL

AUTHOR: Ticiana François Magalhães  
ADVISOR: Mirta Teresinha Petry

Understanding the impacts of reduced soil water availability on soybean yields is paramount in rainfed and irrigation agriculture, especially from the perspective of climate change. Combining field experiments with water balance models can better explain the effect of different agroecological conditions on yield and support management decisions that help mitigate the impact of water deficit by adjusting cropping factors, especially irrigation management. Improving irrigation management implies improving estimates of crop evapotranspiration ( $ET_c$ ), which also involves a more accurate prediction of crop coefficients ( $K_c$ ) throughout the cycle. An approach recently developed by Allen and Pereira (2009) (A&P) estimates single ( $K_c$ ) and basal ( $K_{cb}$ ) crop coefficients from observations of the fraction of ground covered ( $f_c$ ) and plant height ( $h$ ) since these parameters represent the physical basis of the vegetation, such as quantity, type, stomatal resistance, and conductance. In this study, this approach was assessed, along with the SIMdualKc soil water balance model that was calibrated and validated using field observations of soil water content to determine soybean water use and the actual crop evapotranspiration from four relative maturity groups (MG's), under irrigated and rainfed conditions. Field experiments were carried out during the 2018/19 and 2019/20 growing seasons in Rio Grande do Sul, Brazil. The observed data allowed estimating the actual  $K_c$  and  $K_{cb}$  for each segment of the FAO  $K_c$ -curve using the A&P approach and estimating and partitioning the actual  $ET_c$  in soil evaporation ( $E_s$ ) and crop transpiration ( $T_c$ ). The SIMDualKc model was able to simulate the dynamics of the available soil water (ASW), with a coefficient of determination ( $R^2$ ) varying from 0.85 to 0.98 and with a regression coefficient ( $b_0$ ) ranging from 0.97 to 1.03, along the crop cycle of the four MG's, for both irrigation management and growing seasons. The estimation errors were low, with the root mean square error (RMSE) ranging from 3.5 to 4.3% of the total available water (TAW). The actual  $K_c$  and  $K_{cb}$  estimated with both approaches were compared, showing the perfect accuracy of the A&P approach to improve soybean irrigation scheduling. The rainfed treatments showed an average reduction in productivity of 8% in 2018/19 and 14.8% in 2019/20. Comparing observed and estimated soybean grain yield by the linear regression model resulted in a  $b_0$  value between 1.0 and 1.02, indicating that the estimated yield corresponded well with the observed one, showing a good association. The highest  $K_y$  values were obtained for soybean cultivars with MG 5 and 5.5, demonstrating that special attention should be given to water management in cultivars with lower MG.

**Key words:** plant height, water deficit, soil fraction cover, relative maturity group, productivity.



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\Delta A$	Variação do armazenamento de água no solo
A&P	Aproximação Allen & Pereira (2009)
ASW	Água disponível
BH	Balanco hídrico do solo
C	Ascensão capilar
DP	Percolação profunda
Es	Evaporação do solo
$ET_c$ act	Evapotranspiração real ou atual
$ET_c$	Evapotranspiração real da cultura
$ET_o$	Evapotranspiração de referência da grama
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
$F_c$	Fração de cobertura
FDR	Frequency Domain Reflectometer
Fr	Fator de ajuste relativo ao controle estomático da cultura
GDD	Graus dia acumulados
GMR	Grupo de maturidade relativa
h	Altura média de planta
I	irrigação
IAF	Índice de área foliar
$K_c$ act	Coefficiente de cultura atual
$K_c$ end	Coefficiente de cultura final
$K_c$ ini	Coefficiente de cultura inicial
$K_c$ mid	Coefficiente de cultura intermediário
$K_c$	Coefficiente de cultura
$K_c$ 's	Coefficientes de cultura
$K_{cb}$ full	Coefficiente de cultura para condições de máximo recobrimento do solo
$K_{cb}$	Coefficiente de cultura de base
$K_d$	Coefficiente de densidade
$K_e$	Coefficiente de evaporação do solo
$K_s$	Coefficiente de estresse
p	Depleção permitida para a não ocorrência de estresse para as plantas
P	Precipitação
PMP	Ponto de murcha permanente
$R^2$	Coefficiente de determinação
RAW	Linha limítrofe para a ocorrência de estresse
RH	Umidade relativa mínima do ar
RO	Componentes de escoamento superficial
$R_s$	Radiação solar
SF	Fluxo superficial de água
TAW	Total de água disponível no solo
$T_b$	Temperatura base
$T_c$	Transpiração da cultura
$T_{max}$	Temperatura máxima
$T_{min}$	Temperatura mínima
$T_{opt}$	Temperatura ótima
$u_2$	Velocidade do vento a dois metros de altura
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria

$UR_{\min}$	Umidade relativa mínima do ar
WP	Produtividade da água
$Z_r$	Espessura da camada ocupada pelas raízes da planta
$\theta$	Umidade
$\theta_{CC}$	Conteúdo de água na capacidade de campo
$\theta_{PMP}$	Conteúdo de água no ponto de murcha permanente

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

- Figura 1 - Weather data for Santa Maria relative to the two-years experiment: (a; b) maximum and minimum temperature and precipitation; (c; d) reference evapotranspiration and solar radiation, for 2018/19 and 2019/20 growing season, respectively.....22
- Figura 2 - Daily values of the observed (●) and simulated (—) available soil water (ASW, mm) of diverse soybean maturity groups, irrigated (left) and rainfed (right) for the 2018/19 crop season. The horizontal dashed lines represent de total available water (—, TAW, mm) and the readily available water (—, RAW, mm).....34
- Figura 3 - Daily values of the observed (●) and simulated (—) available soil water (ASW, mm) of diverse soybean maturity groups, irrigated (left) and rainfed (right) for the 2019/20 crop season. The horizontal dashed lines represent de total available water (—, TAW, mm) and the readily available water (—, RAW, mm).....35
- Figura 4 - Daily variation of the potential basal crop coefficient ( $K_{cb}$ , —), actual basal crop coefficient ( $K_{cb\ act}$ , - -), actual crop coefficient ( $K_{c\ act}$ , - -), evaporation coefficient ( $K_e$ , —), applied irrigations (—, mm) and precipitations (—, mm), throughout crop development of diverse soybean maturity crops, on 2018/19. On left: irrigated; on right: rainfed.....37
- Figura 5 - Daily variation of the potential basal crop coefficient ( $K_{cb}$ , —), actual basal crop coefficient ( $K_{cb\ act}$ , - -), actual crop coefficient ( $K_{c\ act}$ , - -), evaporation coefficient ( $K_e$ , —), applied irrigations (—, mm) and precipitations (—, mm), throughout crop development of diverse soybean maturity crops, on 2019/20. On left: irrigated; on right: rainfed.....38
- Figura 6 - Linear regression forced through the origin comparing  $K_{cb\ A\&P}$  values (derived from equations 2 to 5) with  $K_{cb\ SIMDual}$  for several soybean maturity groups, irrigated and rainfed, during the 2018/19 and 2019/20 growing seasons. Depicted is the 1:1 line. The regression coefficient forced thorough origin ( $b_o$ ); de determination coefficient ( $R^2$ ) and de root mean square error (RMSE) are also presented inside each graphic.....43
- Figura 7: Daily variation of the potential basal crop coefficient ( $K_{cb}$ , —), actual basal crop coefficient ( $K_{cb\ act}$ , - -) and basal crop coefficient ( $K_{cb\ A\&P}$ , ●) throughout crop development of diverse soybean maturity crops. On left: rainfed and on right: irrigated.....44

### CAPÍTULO II

- Figura 1 - Temperatura máxima e mínima do ar e precipitação (mm), sendo a) 2018/19, b) 2019/20 e Evapotranspiração de referência diária (ET<sub>o</sub>) e radiação solar (MJ<sup>-2</sup>dia<sup>-1</sup>), sendo c) 2018/19 e d) 2019/20.....60

Figura 2 - Variação diária da evaporação do solo (Es, mm, —), transpiração da cultura (Tc, mm, ···) e transpiração potencial (T pot, mm, -) para a soja GMR 5,5: sendo a) e b) 2018/19 irrigado e sequeiro respectivamente e c) e d) 2019/20 irrigado e sequeiro respectivamente.....71

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Figura 1 - Relação entre o coeficiente de cultura basal obtido pela abordagem de Allen & Pereira (2009) e os graus-dia de crescimento para quatro grupos de maturidade da soja, em duas safras no Sul do Brasil, utilizando um polinômio múltiplo de terceira ordem. As barras verticais são o desvio padrão entre as médias..... 81

Figura 2 - Relação entre a fração cobertura do solo (até fechamento do dossel,  $f_c=1$ ) e os graus-dia de crescimento desde a semeadura até o início do estágio intermediário para diversos grupos de maturidade da soja no sul do Brasil.....82

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO I

Tabela 1 - Soil hydraulic characteristics of the experimental site.....	21
Tabela 2 - Soybean crop stages for all maturity groups and irrigation strategies, for both years.....	25
Tabela 3 - Initial and calibrated values of the SIMDual model relative to all treatments, in the 2018/19 and 2019/20 growing seasons.....	27
Tabela 4 - Goodness-of-fit indicators relative to the available soil water (ASW, mm) for all maturity groups in two crop seasons.....	35
Tabela 5 - Soil water balance components simulated using the SIMDualKc model for each soybean maturity group and irrigation strategies during two crop growing seasons, in Santa Maria – RS 2022. ....	41

### CAPÍTULO II

Tabela 1 - Parâmetros físicos e hidráulicos do solo para as áreas experimentais nos dois anos de cultivo.....	60
Tabela 2 - Valores iniciais e calibrados do modelo SIMDualKc relativo a todos os tratamentos, em 2018/19 e 2019/20.....	64
Tabela 3 - Valores médios e desvio padrão da evaporação de água do solo (Es, mm) e transpiração da cultura (Tc, mm) para cada estágio de desenvolvimento dos diferentes GMR, para a condição irrigada e de sequeiro.....	68
Tabela 4 - Produtividade de grãos de soja observada, estimada e variação ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), sob condição irrigada e de sequeiro e estimativa do fator $K_y$ médio da cultura da soja dos dois anos de experimento para cada GMR.....	72
Tabela 5 - Coeficientes médios de regressão ( $b_0$ ) e determinação ( $R^2$ ) relativos à produtividade obtida a campo e simulada pelo SIMDualkc, utilizando o fator de produção em resposta a água ( $K_y$ ).....	74

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tabela 1 - Intervalo em valores, para os dois anos de cultivo, sequeiro e irrigado, dos parâmetros utilizados para as simulações pela abordagem A&P. Santa Maria – RS, 2022. ....	82
---	----

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2. CAPÍTULO I (Artigo Científico).....</b>	<b>18</b>
ABSTRACT.....	18
INTRODUCTION .....	19
MATERIAL AND METHODS .....	22
RESULTS AND DISCUSSION .....	34
CONCLUSION.....	46
REFERENCES .....	47
<b>3. CAPÍTULO II (Artigo Científico) .....</b>	<b>56</b>
RESUMO.....	56
ABSTRACT.....	57
INTRODUÇÃO .....	58
MATERIAL E MÉTODOS .....	60
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	69
CONCLUSÃO .....	76
REFERENCIAS.....	77
<b>4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>80</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de soja, com uma produção estimada em 149 milhões de toneladas para a safra 2021/22 (FAO, 22), em uma área aproximada de 40 milhões de hectares, sendo que, o Rio Grande do Sul colabora com aproximadamente 15% da produção nacional (CONAB, 2022). Em nível de produtor, o rendimento da soja aumentou ~10 vezes nos últimos 50 anos (UMBURANAS et al., 2020), o que pode ser atribuído ao melhoramento genético e as práticas de manejo, como o deslocamento do cultivo para terras baixas (GIACOMELI et al., 2022) e a antecipação de datas de plantio (ZANON et al., 2016) com o uso de cultivares de ciclo mais curto.

A soja é considerada uma planta de dia curto, cuja a taxa de desenvolvimento durante a fase vegetativa é maximizada quando o fotoperíodo está abaixo do valor crítico (TOMAS & RAPER, 1983), que varia entre os diferentes grupos de maturidade relativa (GMR's). No Brasil, os GMR's são tradicionalmente classificadas entre super precoces, precoces, médios e tardios, variando de acordo com a latitude, utilizando-se GMR de 4,0 a -30°S e 10°S próximo ao equador.

A disponibilidade hídrica e fototérmica explicam também a variação da produtividade da soja no estado do Rio Grande do Sul (ZANON et al., 2016). A necessidade hídrica da soja é em média de 500 mm (IRMAK & SHARMA, 2015), mas pode variar dependendo da data de plantio e GMR (ANAPALLI et al., 2018). A diferença de produtividade decorrente da deficiência hídrica pode variar de 500 a 3500 kg ha<sup>-1</sup> ao longo das áreas de produção de soja no Brasil (SENTELHAS et al. al., 2017). Assim, os agricultores desta região tornam-se cada vez mais interessados em GMR de ciclo curto, antecipando os plantios para evitar fotoperíodos mais longos, a falta de precipitação durante o ciclo quando não há irrigação e altas temperaturas (ABRAHÃO & COSTA, 2018). Portanto, o momento de ocorrência do déficit hídrico e os impactos desse nas relações água-produção precisam ser rigorosamente quantificados, para se desenvolver práticas de manejo que permitam o uso eficiente da água da chuva e da irrigação (PEREIRA et al., 2020).

A avaliação dos impactos de diferentes estratégias de manejo da água no rendimento da soja pode ser feita através de modelagem, combinando o balanço hídrico do solo (SWB) com funções de rendimento (PAREDES et al., 2015). Um dos SWB destacados na literatura é o modelo SIMDualK<sub>c</sub> (ROSA et al., 2012), o qual utiliza a metodologia FAO56 na determinação da ET<sub>c</sub> a partir da ET<sub>o</sub> e de um coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>), particularmente o coeficiente de cultura dual (PEREIRA et al., 2020), devido a relevância em se separar a

transpiração da cultura ( $T_c$ ) da evaporação do solo ( $E_s$ ), sobretudo em ambientes com frequência de umedecimento por chuva ou irrigação. A abordagem  $K_c$ - $ET_o$  fornece uma maneira simples e robusta de estimar a  $ET_c$  para várias culturas e condições climáticas (DOORENBOS & PRUITT, 1977; ALLEN et al. 1998), no entanto, ajustes específicos são necessários para uma melhor estimativa da  $ET_c$ , particularmente para as mudanças nas características ao longo do ciclo da cultura, como a duração dos estádios e parâmetros biofísicos que afetam o  $K_c$  e de base ( $K_{cb}$ ).

Recentemente, avanços significativos em metodologias de estimativa dos coeficientes de cultivo simples ( $K_c$ ) e de base ( $K_{cb}$ ) foram apresentados (PEREIRA et al., 2020a, 2021), com foco no uso de observações da planta, como área foliar e ou a fração de cobertura do dossel e altura de plantas, a partir de um estudo primário desenvolvido por ALLEN & PEREIRA (2009). Essa metodologia, conhecida como aproximação A&P, foi usada nesse trabalho, para derivar os coeficientes de cultura da soja, em associação com a modelação do balanço hídrico do solo e dados observados de umidade. A determinação precisa da  $ET_c$  e  $T_c$  nas condições reais de campo ( $ET_{c\ act}$  e  $T_{c\ act}$ ) permite estimar o déficit de evapotranspiração em relação às condições ótimas de cultivo (PAREDES et al., 2015). Esses valores, quando associados a modelos água-produção (STEWART et al., 1977), possibilitam que se estime as perdas de rendimento em função do déficit hídrico, em qualquer estágio de desenvolvimento (PAREDES et al., 2014), assumindo que o rendimento seja linearmente dependente do déficit evapotranspiratório.

As predições, tanto as de eventos abióticos, como a da produção, tem sido uma preocupação desde o surgimento da agricultura moderna. Atualmente, o Brasil contribui com aproximadamente 35% da produção mundial de soja (SCHWALBERT et al., 2020), com flutuações sazonais devido ao déficit hídrico (SENTELHAS et al., 2015), às práticas agronômicas adotadas pelos produtores (TAGLIAPIETRA et al., 2021) e à escolha dos materiais utilizados (BATTISTI et al., 2017). Conhecer o status atual das lavouras e prever o potencial produtivo dessas é fundamental para o mercado global, assim como, para o sistema de armazenamento de grãos e a logística de transporte dessa produção dentro do país e para os canais de exportação. O advento de plataformas em nuvem, como o Google Earth Engine (GORELICK et al., 2017) passou a fornecer acesso fácil e rápido a um grande volume de dados agrometeorológicos e de satélite, os quais permitem prever o rendimento e os componentes do rendimento com relativa precisão (SCHWALBERT et al., 2020).

Uma vez que o déficit hídrico é o principal responsável pelas perdas na produção, ferramentas que investiguem o impacto do déficit e o momento de ocorrência desses precisam



ser exploradas. Entretanto, para determinar as quebras na produção decorrentes do déficit hídrico, há que se conhecer o requerimento hídrico ( $ET_c$ ) da cultura durante o ciclo. Os modelos água-produção foram descritos primeiramente por DOORENBOS & KASSAM (1979), a partir de estudos desenvolvidos por STEWART et al. (1977), como uma relação linear entre a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) e o rendimento de grãos das culturas. Assim, para apropriadamente estabelecer o fator resposta do rendimento à água ( $K_y$ ), é necessário conhecer o rendimento potencial ou máximo ( $Y_m$ ), em condições ótimas de disponibilidade de água ou evapotranspiração ( $ET_c$ ) e a relativa redução no rendimento ( $Y_a$ ), devido à redução na evapotranspiração ( $ET_{act}$ ).

Diante do exposto, o objetivo principal deste estudo foi estimar os coeficientes de cultura simples ( $K_c$ ) e basal ( $K_{cb}$ ) cruzando os valores observados de fração de cobertura do solo pela cultura ( $f_c$ ) e altura de plantas ( $h$ ), juntamente com o modelo SIMDualKc para calibrar e validar  $K_c$  e  $K_{cb}$  para vários grupos de maturidade da soja sob irrigação e sequeiro (Capítulo I); juntamente com isso objetivou-se analisar os componentes do balanço hídrico e a partição da evapotranspiração usando o mesmo modelo e combinar com o modelo água-produção de Stewart para prever o rendimento da cultura da soja, bem como determinar o fator de rendimento ( $K_y$ ) dos diversos grupos de maturação e sua relação com a produtividade da água (Capítulo II).

## 2. CAPÍTULO I (Artigo Científico)

### Water use and crop coefficients of diverse soybean maturity groups under irrigation and rainfed conditions

### Uso da água e coeficientes de cultura de diversos grupos de maturidade da soja sob condição irrigada e de sequeiro

Ticiane Françoís Magalhães<sup>1</sup>

#### ABSTRACT

The FAO-56 two-step approach ( $K_c$ - $ET_o$ ) is commonly used to estimate crop evapotranspiration (ET) for various crops and climate conditions. However, crop coefficients need to be adjusted to regional climate conditions to better estimate crop water requirements and enhance irrigation scheduling. An easy-to-use approach for estimating crop water requirements was developed by ALLEN & PEREIRA (2009) (A&P) which allows estimating the single ( $K_c$ ) and basal crop coefficients ( $K_{cb}$ ) crossing observed values of the fraction of ground cover by the crop ( $f_c$ ) and crop height ( $h$ ) together with tabulated non-observed parameters. In the current study, this approach is tested to assess the crop water use and actual crop evapotranspiration of four soybean maturity groups (MG) under diverse irrigation management strategies. Field experiments were conducted in Southern Brazil along two seasons (2018/19 and 2019/20). Observations included measurements of  $f_c$ , plant height ( $h$ ), and soil water content. Collected data allowed estimating the actual  $K_c$  and  $K_{cb}$  for each segment of the FAO  $K_c$  and  $K_{cb}$  curve using the A&P approach. In addition, the soil water balance model SIMDual $K_c$  was calibrated and validated using the field observations allowing to estimate and partitioning soybean  $ET_{c\ act}$  into soil evaporation and crop transpiration. The actual  $K_c$  and  $K_{cb}$  estimated with both approaches were compared showing the good accuracy of the A&P approach for supporting soybean irrigation scheduling.

25 **Key words:** crop evapotranspiration, *Glycine max* cultivars, A&P approach, basal crop  
26 coefficients, fraction of ground cover, crop height.

27

## 28 **INTRODUCTION**

29 Soybean (*Glycine max*) is the most important crop in Brazil. Located in the South  
30 part of Brazil, between latitudes 27 and 33° S, the State of Rio Grande do Sul represents  
31 approximately 15% of the national production in terms of area and volume. Despite  
32 presenting uniform rainfall regimes throughout the year (VEEK et al., 2022), its irregular  
33 distribution often requires supplemental irrigation to maintain and increase productivity  
34 rates (GIMÉNEZ et al., 2017).

35 At the farms level, soybean yields increased linearly in the last 50 years, mainly  
36 due to the introduction of modern cultivars, with an indeterminate growth habit and a  
37 shorter vegetative cycle between emergence and full flowering (UMBURAMAS et al.,  
38 2022). The use of cultivars with a shorter cycle and the anticipation of sowing dates  
39 allows two crops within the same cycle (CORREA & SCHMIDT, 2014; ZANON et al.,  
40 2016) while allowing the maximum exploitation of the genotype and environment  
41 (MOURTZINIS & CONLEY, 2017). Soybean is considered a short plant, where the rate  
42 of development during the vegetative stage is maximized when the photoperiod is below  
43 the critical value (TOMAS & RAPER, 1983), which varies among the different relative  
44 maturity groups (MG's). In Brazil, MG's are traditionally classified between super early,  
45 early, medium, and late, varying according to latitude, using MG's of 4.0 at -30°S and  
46 10°S near the equator.

47 Water availability and photothermal quotient explain soybean yield variation in  
48 the Rio Grande do Sul state (ZANON et al., 2016). Soybean water requirement averaged  
49 500 mm (IRMAK & SHARMA, 2015), but can vary from 400 mm to 700 mm

50 (DOORENBOS & KASSAM, 1919; GIMÉNEZ et al., 2017), depending on the planting  
51 date and MG's (ANAPALLI et al., 2018). In South Brazil, most soybean water  
52 requirements are supplied by rainfall, as the seasonal amount of precipitation is around  
53 800 mm (WEEK et al., 2022; ZANON et al., 2016). However, the yield gap derived from  
54 water deficit can vary from 500 to 3500 kg ha<sup>-1</sup> along Brazilian soybean production areas  
55 (SENTELHAS et al., 2015), due to the uneven distribution of precipitation, mainly  
56 during seed-filled stages (MONTTOYA et al., 2017). So, farmers in this region become  
57 increasingly interested in short-season MG's in early sowing dates to avoid longest  
58 photoperiods, the lack of in-season precipitation when irrigation is not available and high  
59 temperatures (ABRAHÃO & COSTA, 2018).

60 Water is the major yield-limited factor in soybean production in Brazil. Among  
61 the 14 producer states in Brazil, the Rio Grande do Sul State has shown the most  
62 significant yield gap over the years due to frequent droughts (SENTELHAS et al., 2015;  
63 BATTISTI et al., 2017). Thus, supplemental irrigation may be required to meet crop  
64 evapotranspiration (ET<sub>c</sub>) when the soil water is insufficient to optimize crop production  
65 (GIMÉNEZ et al., 2017; ANAPALLI et al., 2020). Soybean water demand arises from  
66 the need to maintain the canopy biophysical features that are fundamental for growth and  
67 development (ROBINSON et al., 2013) and which are variety/maturity group-specific  
68 parameters (ANDA et al., 2020). While meteorologic conditions primarily drive ET<sub>c</sub>,  
69 canopy characteristics such as leaf area index, plant height, the fraction of soil shaded,  
70 and plant density, among others, will impact the ET<sub>c</sub> (IRMAK et al., 2013), elevating the  
71 need for better determining the ET<sub>c</sub> for more efficiently managing irrigation (PÔÇAS et  
72 al., 2020).

73 A widely accepted methodology for estimating the ET<sub>c</sub> is the so-called two-step  
74 approach, in which the reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) is multiplied by a crop

75 coefficient ( $K_c$ ) (ALLEN et al., 1998; PEREIRA et al., 2015a). The method utilizes  
76 weather data to estimate the  $ET_o$  using the FAO56 Penman-Monteith equation (ALLEN  
77 et al., 1998) for a reference condition, represented by a clipped crop, cool season and  
78 well-watered grass, while the  $K_c$  represents a relative fraction of the  $ET_o$  from a specific  
79 crop cultivated in field conditions (ALLEN & PEREIRA, 2009), describing the physical  
80 and psychological differences between a particular crop to the reference crop (PÔÇAS et  
81 al., 2020). The  $K_c$  can follow a simple or dual approach; the first integrates both crop  
82 parameters and soil evaporations rates into a single  $K_c$ , while the second estimates crop  
83 transpiration and soil evaporations in separate ways, i.e., the basal crop coefficient ( $K_{cb}$ )  
84 and the soil evaporation coefficient ( $K_e$ ), according to ALLEN et al. (1998).

85         The  $K_c$ - $ET_o$  approach provides a simple and robust way to estimate the  $ET_c$  for  
86 various crops and climate conditions (DOORENBOS & PRUITT, 1977; ALLEN et al.,  
87 1998). However, specific adjustments are needed for a better estimate of the  $ET_c$ ,  
88 particularly the changes in crop characteristics throughout the crop cycle, such as the  
89 length of crop stages and biophysics parameters that affect the  $K_c$  and  $K_{cb}$ . Thus, ALLEN  
90 & PEREIRA (2009); PEREIRA et al. (2020a, 2021) recently integrated an easy-to-use  
91 methodology to adjust  $K_c$  (and  $K_{cb}$ ) to a specific climate condition, using plant height,  
92 leaf area index, or the fraction of ground shades by plant canopy. Plant structure and  
93 development can vary between soybean MG's along the crop cycle, so we hypothesized  
94 that  $K_c$  values could be better estimated using plant height and the fraction of soil covered  
95 by the vegetation, as well as the stomatal regulation under several soil availability  
96 conditions. Thus, the main objective of this study was to estimate the single ( $K_c$ ) and  
97 basal crop coefficients ( $K_{cb}$ ) crossing observed values of the fraction of ground cover by  
98 the crop ( $f_c$ ) and crop height ( $h$ ) together with the SIMDualKc model to calibrate and

99 validate both  $K_c$  and  $K_{cb}$  for several soybean maturity groups under irrigation and rainfed  
100 conditions.

101

## 102 MATERIAL AND METHODS

### 103 *Site location, climate and soil*

104 Two field experiments were conducted during the 2018/19 and 2019/2010 crop  
105 growing seasons at the Sistema Irriga® experimental area, located at the Federal  
106 University of Santa Maria (UFSM), city of Santa Maria (29°43'4" S; 53°43'13" W and  
107 95 m above sea level). The soil is classified as an Argissolo Vermelho Distrófico Arênico  
108 (Streck et al. 2014) or an Ultisol, according to Soil Survey Staff (2014), with a texture of  
109 below content clay in the upper layers and a clay horizon below. Undisturbed and  
110 disturbed soil samples were collected at different layers in the two-year experiment for  
111 the textural and hydraulic characterization. The mean results and standard deviation are  
112 summered in table 1.

113

114 Table 1 – Soil hydraulic characteristics of the experimental site.

Soil depth (m)	Texture (%)			$\theta$ ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ )		
	Sand	Silt	Clay	$\theta_{FC}$	$\theta_{PWP}$	Saturation
0-0.2	41 (1.5)	36 (1.5)	23 (0.5)	0.35	0.14	0.50
0.2-0.4	40 (1.4)	33 (1.5)	27 (2.5)	0.32	0.15	0.49
0.4-0.6	34 (2.0)	28 (3.0)	38 (2.5)	0.33	0.15	0.50

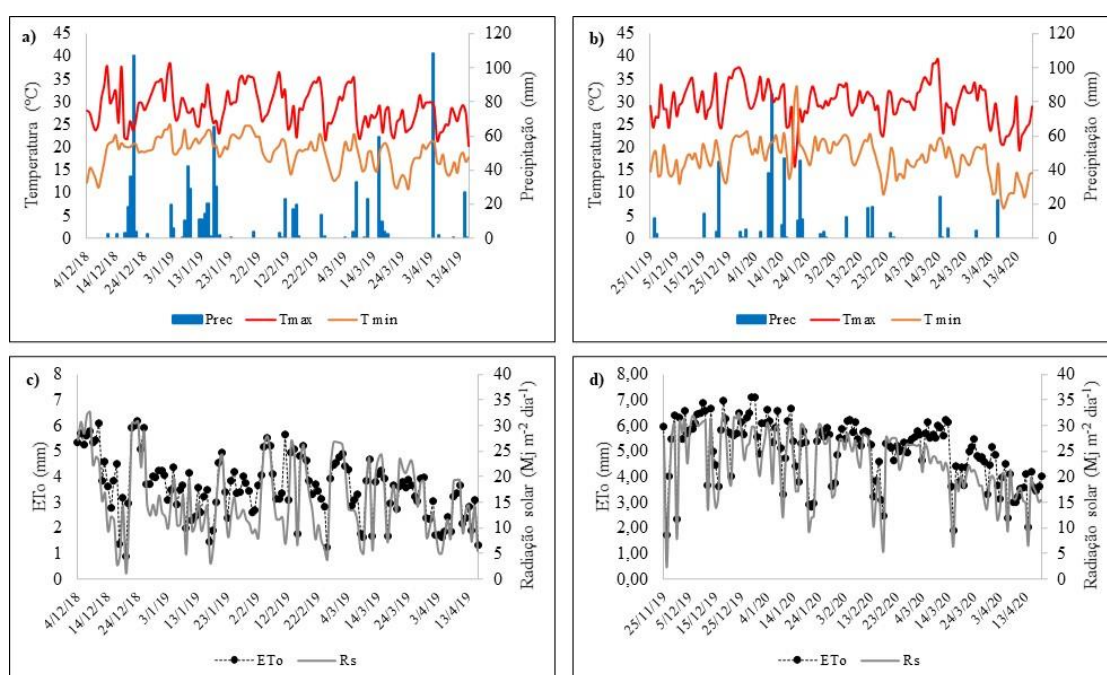
115  $\theta_{FC}$  it the volumetric soil water content at field capacity at -10 kPa;  $\theta_{PWP}$  it the wilting  
116 point at -1500 kPa, derived from PTF's developed by MICHELON et al. (2010). Values  
117 between brackets are the standard deviation from means.

118

119 The local climate is a humid subtropical ("Cfa"), according to the Köppen-Geiger  
120 classification, with well-distributed rainfall throughout the year (~1700 mm) and well-  
121 defined seasons, with hot and humid summers and temperate winters (ALVAREZ et al.,  
122 2013). The average temperature in the hottest month is > 22°C and minimum

123 temperatures in the coldest months ranged from -3 to 18°C. The meteorological  
 124 conditions during the experimentation times were observed in an automatic meteorologic  
 125 station located nearby and is presented in Figure 1. The daily weather data include  
 126 maximum and minimum air temperature (Tmax and Tmin, °C), global solar radiation (Rs,  
 127 MJ m<sup>2</sup> dia<sup>-1</sup>), rainfall (mm dia<sup>-1</sup>) and reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>, mm dia<sup>-1</sup>).

128



129

130 Figure 1: Data weather for Santa Maria relative to the two-years experiment: (a; b)  
 131 maximum and minimum temperature and precipitation; (c; d) reference  
 132 evapotranspiration and solar radiation, for 2018/19 and 1019/20 growing season,  
 133 respectively.

134

### 135 *Experimental design and treatment description*

136 The experiments were arranged in a factorial scheme 2x4, with Factor A being the  
 137 irrigation management (irrigated and rainfed) and factor B being constituted by four  
 138 indeterminate soybean varieties classified in maturity groups (MG's) ranging from 5.0 to  
 139 6.8. In the 2018/19 growing season, the following variety/MG were used in three

140 replicates: Raio (5.0), Elite (5.5), Lança (5.8), and Ícone (6.8), while in the 2019/20  
141 growing season, the two last were replaced by Delta (5.9) and Compacta (6.5), in four  
142 replicates. All varieties were glyphosate-resistant, and seeds were inoculated with  
143 *Bradyrhizobium japonicum* before sowing. All types were sown on December 4th and  
144 November 25th, in 2018/19 and 2019/20, respectively, in a 0.45 m row spacing using 20  
145 and 24 plants m<sup>-2</sup>, upon black oat (*Avena strigosa*) crop residue. Fertilization and general  
146 crop management practices followed recommendation for soybean in Southern Brazil.

147

#### 148 *Field observations and measurements*

149 Plant and soil water content in each plot, considering this information would be  
150 used for modeling the soil water balance and crop growth in both growing seasons,  
151 including:

152 i – Crop stages and phenology: two plants per plot were previously identified and  
153 tagged, for monitoring crops stages, following the phenological scale proposed by FEHR  
154 & CAVINESS (1977); plant height was also measured of these tagged plants using a  
155 millimeter graduated ruler, recording the distance between the soil surface and the last  
156 node on the main stem, on which the central leaflet measured more than 2 cm long. These  
157 observations were taken twice a week.

158 ii – rooting depths ( $Z_r$ , m): at the full flowering stage, trenches were randomly  
159 opened to verify the maximum root depth and root concentration. Results showed that  
160 more than 90% of the root system was in the 0-30 cm layer and just a few masses of roots  
161 were found above 30 cm. Thus, for simulation purpose,  $Z_r=0-60$  cm was adopted.

162 iii – Fraction of green canopy cover: the fraction of ground covered by the  
163 vegetation ( $f_c$ ) was performed using the square points counting method (MANNERING  
164 & MEYER, 1963). A squared grid (0.5 x 0.5 m), composed of 100 intersection points, on



165 which each intersection point corresponds to 1% of the fraction of soil covered. The  
166 number of grid intercepts with and without green vegetation below was then counted, and  
167 the fraction between the ground covered by the foliage and the bare soil was the percent  
168 of  $f_c$ . This grid was placed so that the crop plant rows split the grid into half, being  
169 positioned just above the canopy height until effective crop cover ( $f_c=1$ ). Observations of  
170  $f_c$  were taken between 10:00 am and 03:00 pm, in intervals of  $4(\pm 2)$  days.

171 iv – Soil water content ( $\theta$ ,  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ): the soil water content ( $\theta$ ,  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) was  
172 measured three times a week using FDR sensors (model CS616, Campbell Sci, Logan,  
173 UT, USA), installed in the center of the plots, at 0-0.30 and 0.30-0.60 m depths. The  
174 available soil water (ASW) was calculated by multiplying mean soil water content ( $\theta$ ) by  
175 the layer thickness and then subtracted from the water depth at the permanent wilting  
176 point, for each observation, throughout the crop season.

177 v – irrigation system: a semi-portable, conventional sprinkler irrigation system  
178 with sprinklers type Plona 100, with a flow rate of  $0.8 \text{ m}^3/\text{h}$ , spaced  $12 \times 12$  meters was  
179 used. During the period of germination and crop establishment, irrigations were  
180 homogeneously applied to the experimental area.

181 vi – Harvest and crop yield: the grain yield was assessed in an area of  $3 \text{ m}^2$  in the  
182 center of each plot. Final grain yield was corrected to 13% seed moisture basis.

183 vii - For modeling purposes, the crop development stages were subdivided into  
184 four stages determining the dates of the beginning, end and duration of the phenological  
185 stages: Crop stages were assumed as: 1) initial stage (initial), represented by the period  
186 between sowing and when the crop reached 10% of the ground covered by the crop  
187 foliage; 2) crop growth and development (crop development): rapid vegetative growth  
188 until the beginning of reproductive growth; 3) mid-season: extensive to reproductive  
189 stage and 4) final stage (late season): covering the periods of grain filling, maturation,

190 senescence and harvest (DOORENBOS & PRUITT, 1977; DOORENBOS & KASSAM,  
 191 1979); POPOVA & PEREIRA, 2011). The definition of the beginning, end and duration  
 192 of the phenological stages was established according to field observations as shown at  
 193 table 2.

194

195 Table 2 – Soybean crop stages (days) for all maturity groups and irrigation strategies, for  
 196 both years.

Crop stages on 2018/19							
MG	Sowing date	Initial	Crop development	Mid-season	Late season	Harvest	Total cycle
5			30		30 (2)	29-31/03	116 (1)
5.5				33 (3)			
5.8	04/12/18	21	29 (1)		33 (1)	29/03-03/04	118 (3)
6.8			30 (1)	35 (1)	39 (6)	03-16/04	127 (6)
Crop stages on 2019/20							
MG	Sowing date	Initial	Crop development	Mid-season	Late season	Harvest	Total cycle
5			24	39 (4)	41 (2)		
5.5			25	39	38 (0)	22-27/03	120 (3)
5.9	25/11/2019	20		41 (1)	36 (1)		122 (0)
6.5			25 (1)	50 (10)	45 (3)	30/03-09/04	130 (5)

197 Values (days) in brackets is the standard deviation between the irrigated and rainfed crop  
 198 within the same MG.  
 199

#### 200 *Soil water balance simulation*

201 The soil water balance (SWB) was simulated for each irrigation strategy and  
 202 soybean MG in both years using the SIMDualK<sub>c</sub> model (ROSA et al., 2012a). The model  
 203 uses the dual crop coefficient (K<sub>cb</sub>) methodology, developed by ALLEN et al. (1998) and  
 204 widely reported by FAO-56, partitioning crop evapotranspiration (ET<sub>c</sub>) into plant  
 205 transpiration (T<sub>c</sub>) and soil evaporation (E<sub>s</sub>). The model computes the daily SWB in the

206 root zone, computing the water depletion of the of the day as proposed by ALLEN et al.  
 207 (1998, 2005):

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P_i - RO_i) - I_i - CR_i + ET_{c\ act,i} + DP_i \quad (1)$$

208 Where  $D_{r,i}$  and  $i-1$  is the depletion in the root zone at the end of the day  $i$  and  $i-1$  (mm),  
 209  $P_i$  is the precipitation (mm),  $RO_i$  is the run-off (mm),  $I_i$  is the net irrigation depth that  
 210 infiltrates into the soil (mm),  $CR_i$  is the capillary rise from groundwater (mm),  $ET_{c\ act, i}$  is  
 211 the actual crop evapotranspiration (mm), e  $DP_i$  is the deep percolation from the root zone  
 212 (mm). In this field study, the water table is more than 1 m deep, so CR was assumed as  
 213 null. The values of RO and DP used in this work were those calibrated by MARTINS et  
 214 al. (2013), in the same location experimental field.  $ET_{c\ act}$  refers to the actual cropping  
 215 systems, ie, from optimal conditions to deficient or absence of irrigation, in different  
 216 cropping systems.

217

218 The model requires a set of input data, according to PEREIRA et al. (2015), as  
 219 followed:

220 I – Daily meteorological data: reference evapotranspiration ( $ET_o$ , mm), rainfall  
 221 (mm), maximum and minimum temperature ( $^{\circ}C$ ), minimum and maximum relative  
 222 humidity (%) and wind speed at 2 m height ( $m\ s^{-1}$ ), which are presented at Figure 1.

223 ii – Soil data: soil data and the number of layers (table 1), the characteristics of  
 224 soil evaporation and thickness of the evaporation layer ( $Z_e$ ), the readily evaporation water  
 225 (REW) and the total evaporable water (TEW), as well as the soil water content at sowing  
 226 data, which is expressed as a % of the TAW and TEW, respectively (Table 3).

227

228

229 Table 3: Initial and calibrated values of the SIMDualK<sub>c</sub> model relative to all treatments,  
 230 in the 2018/19 and 2019/20 growing seasons.

Parameters	Initial GIMÉNEZ et al. (2017)	Calibrated values
Crop parameters		
K <sub>cb ini</sub>	0.15	0.15
K <sub>cb med</sub>	1.10	1.02
K <sub>cb end</sub>	0.35	0.30
Depletion factor (p)	0.5	0.5
Soil evaporation		
TEW (mm)	49	27
REW (mm)	12	10
Ze (m)	0.15	0.10
Deep percolation		
	Initial MARTINS et al. (2013)	Calibrated values
aD	353	330
bD	-0,022	-0,020
Runoff (CN)	75	85

231 K<sub>cb</sub> = basal crop coefficients for initial (K<sub>cb ini</sub>), mid-season (K<sub>cb mid</sub>) and end season (K<sub>cb</sub>  
 232 end); Ze = depth of the soil evaporable layer; TEW = total evaporable water; REW =  
 233 readily available water; CN = curve number; aD and bD are the parameters of the  
 234 percolation equation (LIU et al., 2006).

235

236 iii – data of the crop: the crop stages, named after initial, crop development, mid-  
 237 season and late or final crop stages; the basal crop coefficients for each of those stages  
 238 (K<sub>cb ini</sub>; K<sub>cb mid</sub> and K<sub>cb end</sub>). We used the K<sub>cb</sub> values calibrated by GIMÉNEZ et al. (2017)  
 239 for soybean in Uruguay for 2018/19 and validated them with observed data from the  
 240 2019/20 crop season. The soil water depletion for no stress (p) for all stages; root depths  
 241 (Zr, m), plant height (h, m) and the fraction of ground covered by the canopy (fc) during  
 242 the crop season (table 3).

243 iv – Irrigation scheduling and depths: the irrigation timing was performed by  
 244 Sistema Irriga®, an irrigation management and monitoring service that uses a soil water  
 245 depletion factor of 0.40; that is, irrigation was triggered whenever the available soil water

246 keep nearly 60% of the total available water (TAW). In this study, the maximum root  
 247 depth overserved was 0.60 m, with almost 90% recorded at the 0.30 top soil layer. The  
 248 irrigation system used was conventional sprinkler, with the fraction of soil effectively  
 249 wetted (fw) by the irrigation system equal to 1.0.

250

251 *Estimating  $K_{cb}$  from plant height and fraction of ground covered by plant canopy*

252 The  $K_{cb}$  values for the main crop development stages (initial, development, mid-  
 253 season, and late/end) were previously calculated using the methodology proposed by  
 254 ALLEN & PEREIRA (2009), extensively revised by PEREIRA et al. (2020, 2021).  
 255 According to this methodology, the basal crop coefficient ( $K_{cb}$ ), which primarily  
 256 represents the crop transpiration, can be estimated as a function of a density coefficient  
 257 ( $K_d$ ), represented by the LAI or the fraction of ground covered by the crop of interest ( $fc$ ),  
 258 as follows:

$$K_{cb} = K_{c \min} + K_d (K_{cb \text{ full}} - K_{c \min}) \quad (2)$$

259 Where:  $K_{cb}$  is an approximated value represented by the density coefficient;  $K_{c \min}$  is the  
 260 minimum value of  $K_c$  of bare soils, being typically 0.15 for field crops; the  $K_d$  is the  
 261 density coefficient (Equation 4); and  $K_{cb \text{ full}}$  is the basal  $K_c$  value of the crop for  
 262 conditions of maximum soil cover (i.e., a crop growing under standard cropping  
 263 conditions) obtained by equation 4.

264

265 The  $K_{cb \text{ full}}$  was estimated following ALLEN et al. (1998), where  $K_{cb \text{ full}}$  represents  
 266 the upper limit on  $K_{cb \text{ mid}}$ , when the crop of interests completely shaded the ground below,  
 267 which generally occurs when  $LAI > 3$  in no-stress conditions and its value can be  
 268 calculated using an adjusted function to climate, as follows:

$$K_{cb\ full} = Fr \left( \min \left( 1.0 + 0.2h.1.20 \right) + \left[ 0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45) \right] \left( \frac{h}{3} \right)^{0.3} \right) \quad (3)$$

269 Where: Fr (0–1) is an adjustment factor relative to the stomatal control of vegetation,  
 270 while the min function assumes that 1.20 is the upper limit for  $K_{cb\ full}$  before adjustment  
 271 for local climatic conditions, h (m) is the average of the maximum height of the crop,  $u_2$   
 272 ( $m\ s^{-1}$ ) is the average wind speed at 2 m height, URmin (%) is the minimum relative  
 273 humidity.

274

$$Kd = \min \left( 1, M_L f_{c\ eff}, f_{c\ eff} \left( \frac{1}{1+h} \right) \right) \quad (4)$$

275 Where:  $f_{c\ eff}$  is the effective fraction of the soil covered or shaded by the crop canopy;  
 276 ML is a multiplier factor on  $f_{c\ eff}$  that describes the effect of canopy density on shading  
 277 and on the maximum relative  $ET_c$  of the shaded or covered area, and extensively used as  
 278 1 to 2 (adopting as 2 in this study).

279

280 Adopting the Fr definition given by ALLEN et al. (1998), the variability of leaf  
 281 resistance can be assumed as:

$$Fr \approx \frac{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}{\Delta + \gamma \left( 1 + 0.34u_2 \frac{r_l}{100} \right)} \quad (5)$$

282 Where  $r_l$  is the mean leaf resistance of the cultivated vegetation ( $s\ m^{-1}$ ),  $\Delta$  is the slope of  
 283 the saturation vapor pressure ( $kPa\ ^\circ C^{-1}$ ),  $\gamma$  is the psychrometric constant ( $kPa\ ^\circ C^{-1}$ )  
 284 relative to the period when  $K_{cb\ full}$  is computed,  $u_2$  is the wind speed at 2 m height. The  
 285 standard value of Fr is 1.0 for most field crops due to the resistance ( $r_l$ ) is approximately  
 286  $100\ s\ m^{-1}$  (PEREIRA & ALVES, 2013).

287

288

289 *Model calibration and validation and statistical indicators*

290           The model calibration and validation for the various soybean MG's, in both years,  
291 were performed using data sets for each year. Firstly (2018/19 growing season), we used  
292 the basal crop coefficients ( $K_{cb\ ini}$ ,  $K_{cb\ mid}$  and  $K_{cb\ end}$ ) calibrated by GIMÉNEZ et al.  
293 (2017) and validated them using the 2019/20 growing season. A tentative and error trial  
294 procedure was the used for the  $K_{cb}$  and p values aiming to minimize the differences  
295 between the available soil water observed and simulated by the model. Some parameters  
296 related to the soil evaporation, the deep percolation and the curve number were slightly  
297 different between the experimental sites in the two years.

298           The means were evaluated graphically and with statistics indicators in order to  
299 assess the goodness of fit of the SIMDualKc model predictions to the observed data.  
300 Qualitative analysis through graphs allows us to observe whether there are trends or  
301 biases of over or under-estimation by the model and when they occurred. The statistical  
302 strategy was carried out using a set of indicators, such as the regression forced through  
303 the origin between observed and simulated data of the soil water content in the root zone.  
304 A regression coefficient ( $b_0$ ) is close to 1.0 when the covariance approaches the variance  
305 of observed values, indicating that predicted and observed values were statistically  
306 similar; the coefficient of determination ( $R^2$ ) indicates the correlation between observed  
307 and estimated data. A  $R^2$  close to 1.0 shows that most of the total variance of observed  
308 values was explained by the model (MORIASI et al., 2007). Additionally, a set of  
309 indicators listed below was used (LEGATES & MCCAB, 1999; MORIASI et al., 2007;  
310 PEREIRA et al., 2015), where  $O_i$  and  $P_i$  represent the pair of observed and predicted  
311 values given variable ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) and  $O^-$  and  $P^-$  are the respective mean values:

312 a) The regression coefficient and the coefficient of determination relating to  
 313 observed and predicted data, are defined as:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i}{\sum_{i=1}^n O_i^2} \quad (7)$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left[ \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5} \left[ \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad (8)$$

314 b) The root mean square error (RMSE) is the error itself, which aims at a  
 315 value closer to zero and characterized the variance of the error:

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (9)$$

316 c) The average absolute error (AAE), which expresses the mean size of  
 317 estimation error:

$$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (10)$$

318 d) The average relative error (ARE, %), which expresses the size of errors:

$$ARE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \quad (11)$$

319 e) The modeling efficiency (EF, dimensionless), proposed by NASH &  
 320 SUTCLIFFE (1970), was calculated in order to assess the quality of the modeling, as it  
 321 represents the relative magnitude of the residual variance compared to the variance of  
 322 the measured data. Values close to zero or negative implies that the average of the  
 323 observed values is very good or better than those simulated by the model (MORIASI et  
 324 al., 2007). Thus, obtaining positive values should be the highest purpose.



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

325

326 *Parameterization of the A&P approach*

327         The target of this study was to assess the  $K_{cb}$  values throughout soybean MG's  
328 development cycle using data retrieved from field observations, such as  $fc$  and plant  
329 height, as well as, soil moisture and climate conditions. So, the SWB was simulated using  
330 the SIMDual $K_c$  model (ROSA et al., 2012a), using field observed data listed at section  
331 2.4. Later, the  $K_{cb}$  values derived via SWB modeling ( $K_{cb}$  SIMDual) were compared to  
332 those derived from the A&P approach ( $K_{cb}$  A&P) (ALLEN & PEREIRA, 2009). Initially,  
333 we used the Fr and ML parameters parameterized by PEREIRA et al. (2021b) for  
334 soybean; for the adjustment of plant height ( $1+K_h h$ ) we used  $kh=0.2$ , because the  
335 soybean varieties used in narrow-row spacing cropping systems have considerable leaf  
336 area, as well as canopy height. In this case,  $kh=0.1$  tended to underestimate the  $K_{cb}$  during  
337 mid and late season. Contrary of the observations made by PEREIRA et al. (2021b),  $h$   
338 and  $fc$  did not decrease until near the harvest date. The leaf senescence phenotype (i.e.,  
339 the whole plant yellows at the same time) provides a fast and homogeneous maturity of  
340 the canopy for most of the MG's planted in Southern Brazil (MG<6.0), unless water  
341 stress occurred. Polynomial regression equations provided a good fit between the GDD  
342 and  $fc$  and also in estimating the GDD needed to reach mid-season.

343         Anytime when the soil water stress limited crop transpiration, a stress coefficient  
344 was considered (i.e., the  $ET_{c \text{ act}} < ET_c$  or  $K_{cb \text{ act}} = K_{cb}K_s$ ) ( $K_s < 1.0$ ) by adjusting the Fr  
345 downward ( $Fr < 1$ ) till the statistics showed good agreement with the  $K_{cb}$  SIMDual values  
346 for the dates when field observations were available. Leaf senescence naturally increases  
347 stomatal closure; however, no significant alterations in  $fc$  were observed immediately

348 after the soil water stress starts because senescence starts first in the lower third of the  
349 canopy height, not showing an immediate effect on plant vigor reduction, in  $f_c$  and,  
350 canopy height.

351

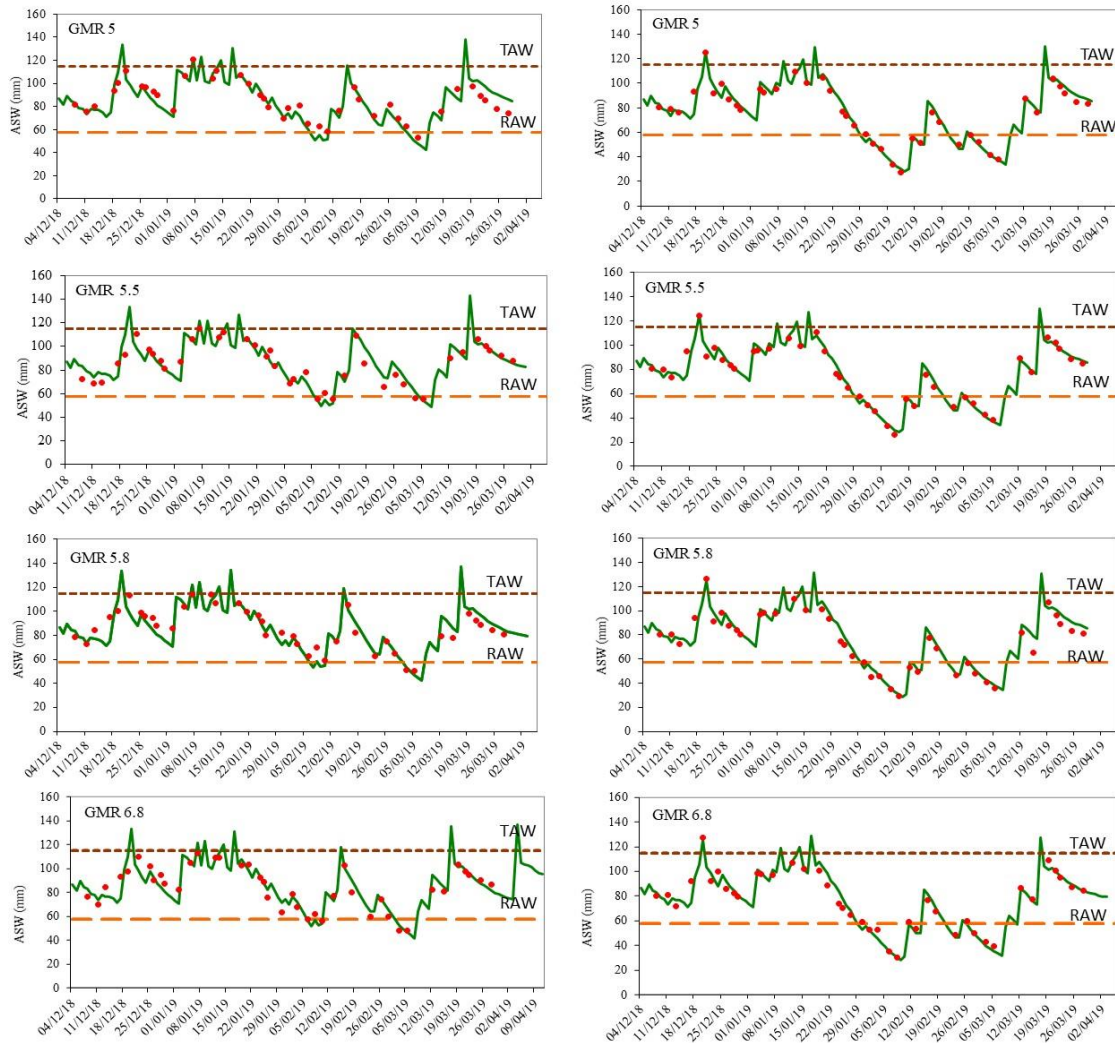
## 352 **RESULTS AND DISCUSSION**

### 353 *Model Calibration and Validation*

354 The initial parameters used in the SIMDualK<sub>c</sub> model to simulate the four MG's, in  
355 irrigated and rainfed conditions, in the two growing season evaluated area presented in  
356 Table 3. Observed and simulated available soil water (ASW) for the four MG are  
357 presented on Figure 2 and Figure 3, for rainfed and irrigated conditions, in 2018/19 and  
358 2019/20 growing seasons. The goodness of fit indicators for all MG's in both years are  
359 shown in table 4. The figure shows that the model simulated well the ASW (mm) for  
360 irrigated and rainfed soybean in both growing seasons, with a  $b_0$  close to 1.0 and  $R^2 > 0.85$ ,  
361 indicating that predicted and simulated values were quite similar. The estimation of errors  
362 was also small, with the RMSE values ranging from 3.49 to 7.20 mm, which represents  
363 <6.2% of the TAW.

364 In general, the statistical indicators indicate that the SIMDualK<sub>c</sub> model is suitable  
365 for simulating the ASW of soybean in southern Brazil, for a variety of relative maturity  
366 groups and irrigation strategies. On the other hand, the K<sub>cb</sub> for each crop stage needs to be  
367 calibrated, observing the beginning and duration of the main crop stages, especially the  
368 progression of leaf senescence and canopy height in these periods.

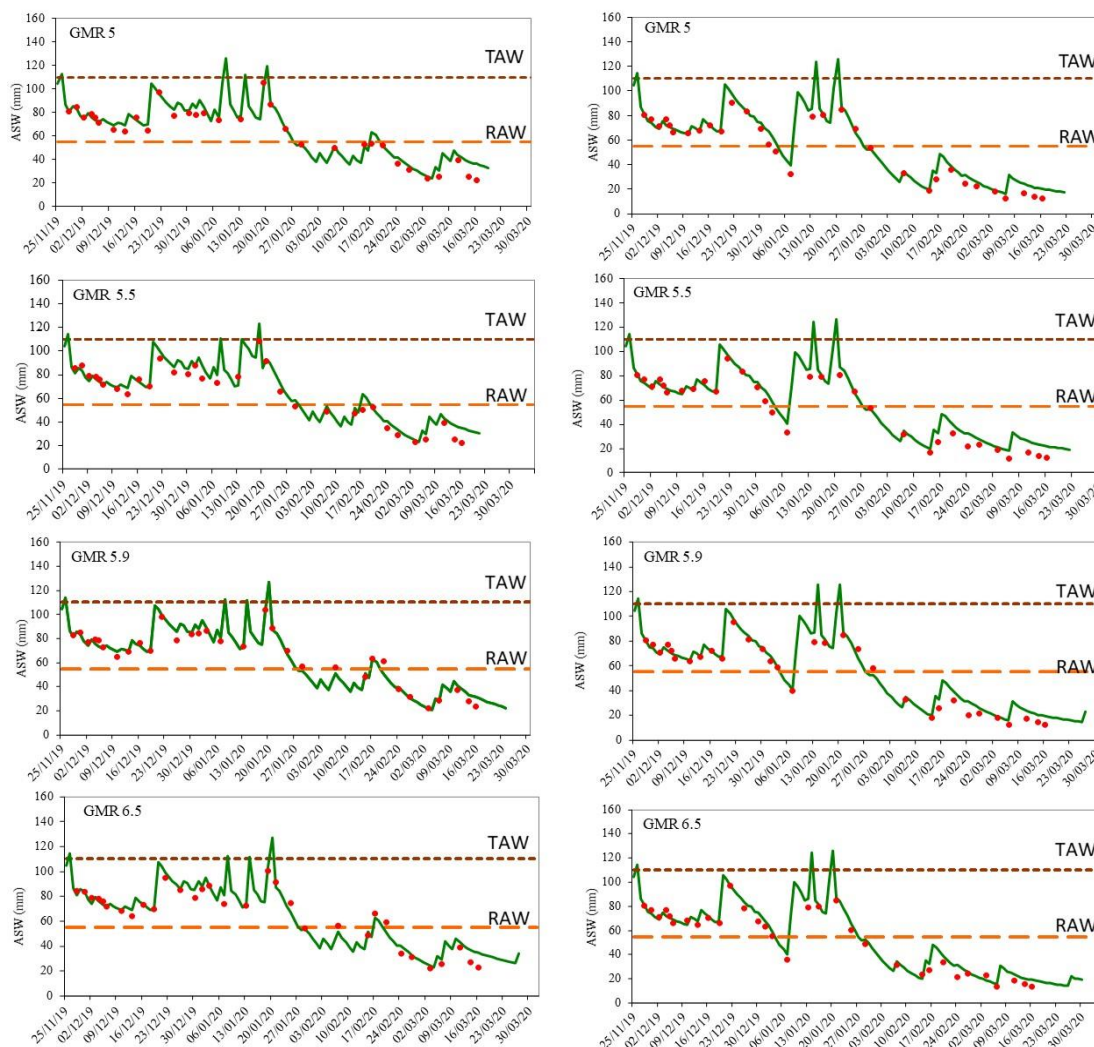
369



370

371 Figure 2 – Daily values of the observed (●) and simulated (—) available soil water  
 372 (ASW, mm) of diverse soybean maturity groups, irrigated (left) and rainfed (right) for the  
 373 2018/19 crop season. The horizontal dashed lines represent de total available water (—, TAW, mm) and the readily available water (—, RAW, mm).

375



376

377 Figure 3 – Daily values of the observed (●) and simulated (—) available soil water  
 378 (ASW, mm) of diverse soybean maturity groups, irrigated (left) and rainfed (right) for the  
 379 2019/20 crop season. The horizontal dashed lines represent de total available water (—, TAW, mm)  
 380 and the readily available water (—, RAW, mm).

381

382 Table 4 – Goodness-of-fit indicators relative to the available soil water (ASW, mm) for  
 383 all maturity groups in two crop seasons.

Goodness of fit indicators	MG	$b_0$	$R^2$	RMSE	RMSE/TAW	ARE	AAE	EF
				(mm)	(%)	(%)	(mm)	
2018/19 crop season								
Irrigated	5.0	0.98	0.95	4.92	4.28	5.17	4.12	0.91
	5.5	1.00	0.85	7.20	6.26	6.62	5.32	0.84
	5.8	0.97	0.87	7.14	6.21	6.19	5.35	0.84

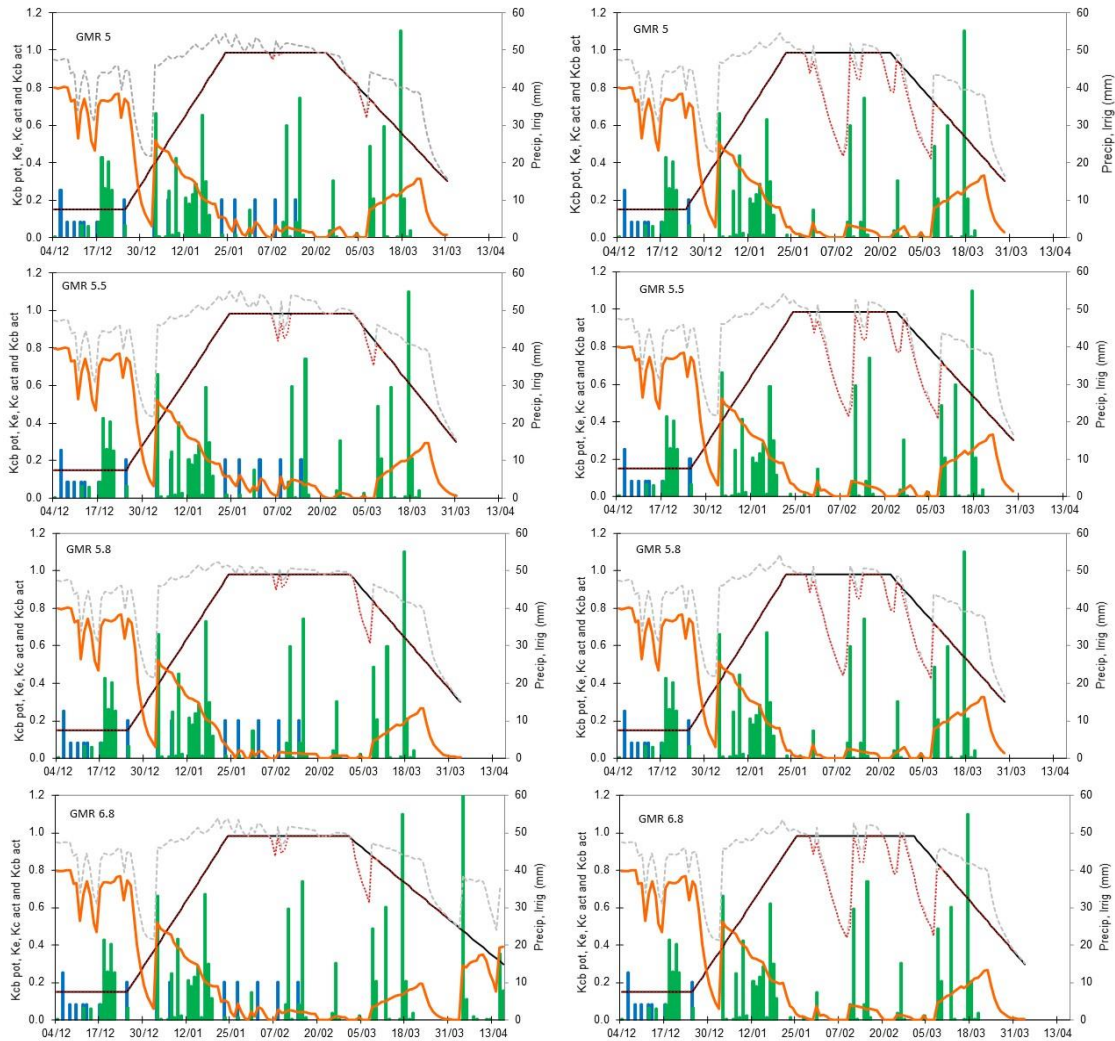
	6.8	0.99	0.87	6.81	5.92	6.64	5.44	0.87
Rainfed	5.0	1.01	0.96	5.09	4.43	4.82	3.64	0.96
	5.5	1.01	0.95	5.25	4.57	5.13	3.79	0.96
	5.8	1.01	0.95	5.45	4.74	5.56	4.01	0.96
	6.8	1.01	0.95	5.76	5.01	5.96	4.43	0.95
2019/20 crop season								
Irrigated	5.0	1.02	0.97	4.76	4.33	8.3	3.47	0.95
	5.5	1.04	0.94	6.11	5.56	10.39	4.77	0.93
	5.8	1	0.96	4.6	4.18	8.01	3.49	0.96
	6.8	1	0.97	3.49	3.33	5.53	2.64	0.97
Rainfed	5.0	1.03	0.98	4.58	4.16	12.03	3.68	0.97
	5.5	1.03	0.98	5.27	4.79	16.16	4.27	0.96
	5.8	1.02	0.98	4.35	3.95	12.18	3.42	0.97
	6.8	1.03	0.98	4.18	3.80	10.6	3.53	0.97

384 Notes:  $b_0$  and  $R^2$  are the coefficients of regression and determination, respectively; RMSE  
385 is the root square mean error; RMSE/TAW is the ratio between the total available water  
386 (TAW) and the RMSE; ARE is the average relative error; AAE is the average absolute  
387 error and EF is the modelling efficiency.  
388

389 *Evapotranspiration partitioning: the basal crop coefficient ( $K_{cb}$ ), crop coefficient ( $K_c$ )*  
390 *and the evaporation coefficient ( $K_e$ )*

391 The evaporation coefficient ( $K_e$ ), basal crop coefficient ( $K_{cb}$ ), actual basal crop  
392 coefficient ( $K_{cb \text{ act}}$ ) and the actual crop coefficient ( $K_{c \text{ act}}$ ) are shown in Figures 4 and 5,  
393 for several MG's and two irrigation strategies (irrigated and rainfall). For the rainfed  
394 treatments, several periods of water deficit can be observed when the  $K_{c \text{ act}}$  curve was  
395 below the  $K_{cb}$  curve due to the increase in the water stress coefficient ( $K_s$ ). Whenever the  
396 ASW is below the RAW, the  $ET_{c \text{ act}}$  is reduced (ROSA et al., 2012), which can be  
397 observed by the differences in  $ET_{c \text{ act}}$  between irrigated and rainfed areas. The calibrated  
398 value of  $K_{cb}$  was 1.02, which is lower than the  $K_{cb}$  calibrated by GIMÉNEZ et al. (2017)  
399 (1.07) but almost the same simulated by PETRY et al. (2020), using the SIMDualKc  
400 model for the same climate conditions.

401



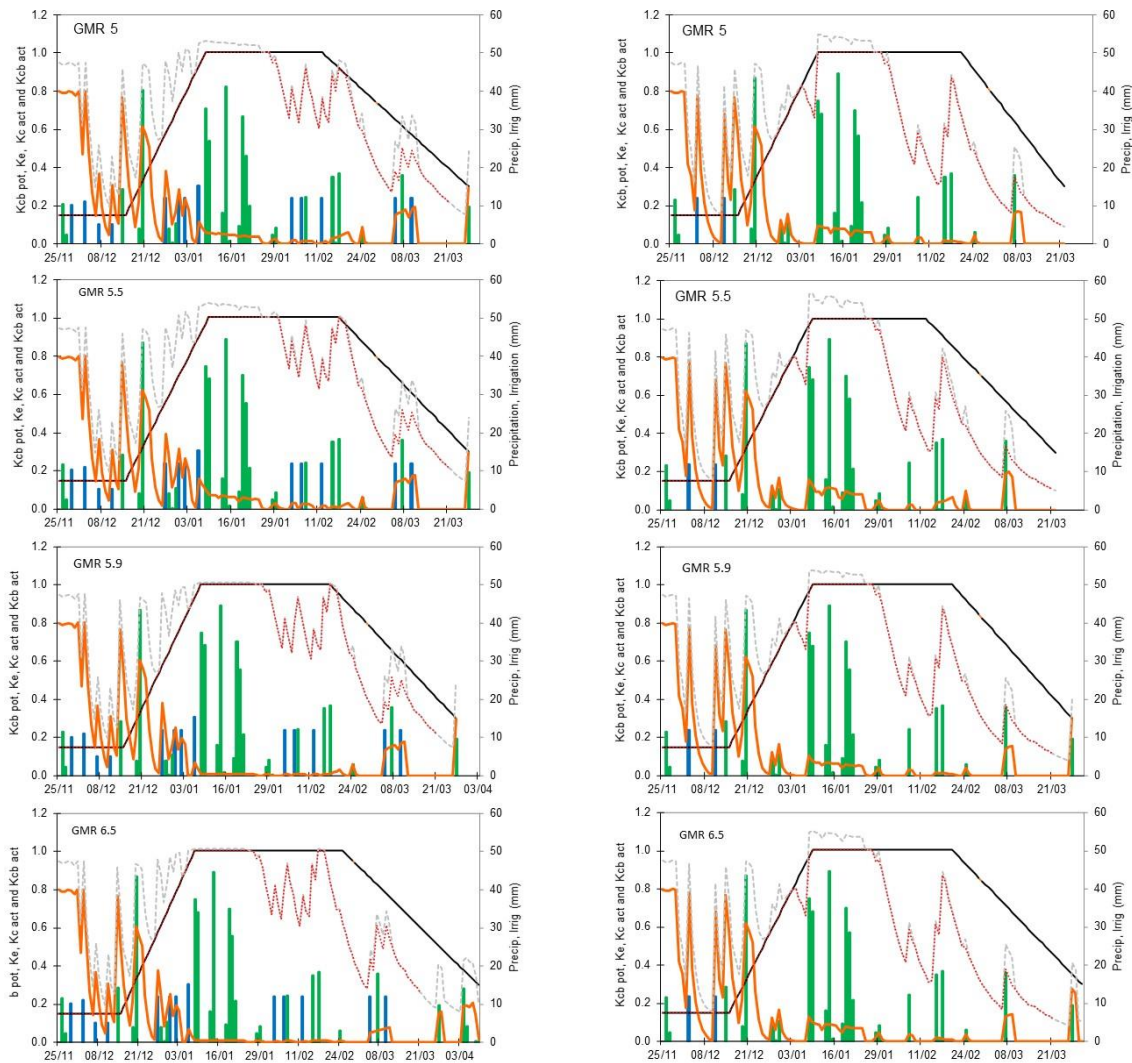
402

403 Figure 4 – Daily variation of the potential basal crop coefficient ( $K_{cb}$ , —), actual basal  
 404 crop coefficient ( $K_{cb\ act}$ , - -), actual crop coefficient ( $K_{c\ act}$ , - -), evaporation coefficient  
 405 ( $K_e$ , —), applied irrigations (—, mm) and precipitations (—, mm), throughout crop  
 406 development of diverse soybean maturity crops, on 2018/19. On left: irrigated; on right:  
 407 rainfed.

408

409 In all treatments,  $K_e$  values were higher during the initial crop stages and after  
 410 events that wetted the soil surface, i.e., after an irrigation or precipitation event. Soil  
 411 evaporation ( $E_s$ ) decreased as the crop canopy increased and shades de soil surface ( $f_c$ ) or  
 412 with an increase in leaf area index (LAI) and plant height increasing.  $E_s$  is energy and  
 413 soil moisture dependent; so, with more solar radiation intercepted by the crop canopy,

414 lower ins de evaporation rate and lower is  $K_e$ ; at the end of the crop cycle, when  
 415 senescence increases as LAI decreases, the  $K_e$  values rose again due to the occurrence of  
 416 precipitation that wetted the soil surface.  
 417



418  
 419 Figure 5 – Daily variation of the potential basal crop coefficient ( $K_{cb}$ , —), actual basal  
 420 crop coefficient ( $K_{cb}$  act, - -), actual crop coefficient ( $K_c$  act, - -), evaporation coefficient  
 421 ( $K_e$ , —), applied irrigations (—, mm) and precipitations (—, mm), throughout crop  
 422 development of diverse soybean maturity crops, on 2019/20. On left: irrigated; on right:  
 423 rainfed.  
 424

425 The crop coefficient curves changed slightly within the growing seasons, MG's,  
426 and irrigation management (Figures 4 and 5), particularly the duration of the late season.  
427 In the 2018/19 growing season, the total length of MG 6.8 was 133 in irrigated conditions  
428 and 120 in rainfed cropping systems (11% less). In 2019/20 contrary, which was a much  
429 drier year than the previous one, the most significant difference was observed in the  
430 duration of the late season for the 6.5 MG (10 days), comparing irrigated and rainfed  
431 soybean. The length of crop stages affected the seasonal  $ET_{c \text{ act}}$  and, consequently, the  $K_{cb}$   
432 and  $K_c$ . IRMARK et al. (2014) and SANDHU & IRMAK (2022) also found that the  
433 seasonal variation and total  $ET_{c \text{ act}}$  were higher when more rainfall events were observed.

434 The SWB components throughout the soybean crop cycle, for the different MG's  
435 are presented in Table 5. The  $ET_{c \text{ act}}$  is the main component of the water balance output,  
436 being dependent on the soil water availability, the crop stage and the evaporative demand  
437 of the atmosphere ( $ET_o$ ). The cumulative  $ET_{c \text{ act}}$  averaged 435 and 459 mm for the  
438 irrigated treatments, while in rainfed conditions the  $ET_{c \text{ act}}$  averaged 397 and 391 mm for  
439 all MG's, in 2018/19 and 2019/20 crop seasons, respectively. Differences in the  $ET_{c \text{ act}}$   
440 between irrigated and rainfed soybean were 9 and 19% for the 2018/19 and 2019/20  
441 growing seasons, respectively (Table 5). We also observed a slight transpiration and  
442 evapotranspiration deficit ( $T_d$  and  $ET_d$ ) between potential ( $ET_c$ ) and actual  
443 evapotranspiration ( $ET_{c \text{ act}}$ ) even in the irrigated treatment in the driest crop season  
444 (2019/20), at about 18%. The observed  $T_d$  and  $ET_d$  for the rainfed treatments were around  
445 31%, in the 2019/20 crop season, mainly due to the lack of precipitation during the mid-  
446 season, in which pod and grain filling occur. HIRAYAMA et al. (2006) and  
447 GUIMARÃES et al. (2016) also found out that  $ET_c$  was reduced through the imposition  
448 of water deficit due to the reduction of soil evaporation ( $E_s$ ), as well as the decrease in  
449 crop transpiration ( $T_c$ ) due to the closing of the stomata. The  $T_d$  is a way to detect crop



450 water stress and direct the water-yield relations, as also observed by GAJIC et al. (2018)  
451 and GIMÉNEZ et al. (2017) for several water regimes in soybean production in Serbia  
452 and Uruguay, respectively. PETRY et al. (2020) simulated the SWB, which resulted in an  
453  $ET_{c\ act}$  ranging from 392 to 263 mm, for soybean cropped in a rain-out shelter, keeping  
454 the available soil water above 75 and 50% of the TAW throughout the development  
455 cycle.

456         The results of the soil water balance show higher losses by RO and DP than the  
457  $ET_{c\ act}$  in all treatments in the 2018/29 crop season due to the frequency and amount of  
458 precipitation being more significant than the normal climatological for this period of the  
459 year (December and January). Approximately 64% of the rainfall resulted in surface  
460 runoff and deep percolation (DP) loss in the irrigated treatments. In the rainfed cropping  
461 system, the values observed for RO were similar to the DP, corresponding to 18% of the  
462 total precipitation. A similar result was simulated by ANTONELLO (2019), who  
463 observed 44 and 27% of water losses by DP in a field experiment, irrigated and rainfed,  
464 respectively. PAREDES et al. (2018) found a percentage of 45% of rain loss under total  
465 irrigation area in studies with barley. The DP is also dependent on the amount of  
466 precipitation, soil characteristics, and soil moisture at the time of rainfall, and all water  
467 that is above field capacity or TAW will be lost by percolation, and the time for this  
468 percolation to happen depends on the hydraulic conductivity of the soil, as well as the  
469 volume of water to be percolated (LIU et al., 2006).

470 Table 5 – Soil water balance components simulated using the SIMDualKc model for each soybean maturity group and irrigation strategies during  
 471 two crop growing seasons.

		2018/19 crop season															
Irrig strategy	MG	Pe (mm)			Irrigation Depht (mm)			NI	RO (mm)	DP (mm)	$\Delta$ ASW (mm)	ET <sub>c act</sub> (mm)			ET <sub>c</sub> (mm)		
		Veg	Rep	Tot	Veg	Rep	Tot					Veg.	Rep.	Tot	Veg	Rep	Tot
Irrigated	5.0	163	341	504	73	51			300	215	34	144	280	424	144	280	424
	5.5	250	235	485					319	196	34	187	237	424	188	239	427
	5.8	267	236	503	83	41	124	16	300	214	38	202	227	429	202	230	432
	6.8	252	333	585					350	226	02	202	261	463	202	267	469
Rainfed	5.0	156	343	499	44			7	305	155	32	144	255	399	144	280	424
	5.5	249	238	487					317	144	32	164	235	399	170	255	425
	5.8	260	237	497					307	156	32	187	209	396	187	233	420
	6.8	250	238	488					316	142	39	166	238	404	167	269	436
		2019/20 crop season															
Irrig strategy	MG	Pe (mm)			Irrigation Depht (mm)			NI	RO (mm)	DP (mm)	$\Delta$ ASW (mm)	ET <sub>c act</sub> (mm)			ET <sub>c</sub> (mm)		
		Veg	Rep	Tot	Veg	Rep	Tot					Veg.	Rep.	Tot	Veg	Rep	Tot
Irrigated	5.0	142	208	350					99	122	78	186	262	448	186	328	514
	5.5	288	86	374					75	145	79	257	193	450	257	265	522
	5.9	277	75	374	83	59	142	13	75	155	79	235	206	441	235	278	513
	6.5	288	105	393					75	148	79	277	190	467	277	301	578
Rainfed	5.0	157	207	364					74	104	92	169	208	377	177	304	481
	5.5	289	74	363					73	102	92	242	138	380	250	238	488
	5.9	277	98	375	24			2	74	110	88	222	155	376	225	272	497
	6.5	288	86	374					74	108	91	236	146	382	240	272	512

472 Pe is the effective precipitation; Veg and Rep are related to vegetative and reproductive; NI is the number of irrigations; RO is the run-off; DP is  
 473 the deep percolation,  $\Delta$  ASW is the variation of the available soil water from the beginning to the end of the cycle; ET<sub>c act</sub> and ET<sub>c</sub> are the actual  
 474 and potential crop evapotranspiration; MG is the respective maturity group.

475

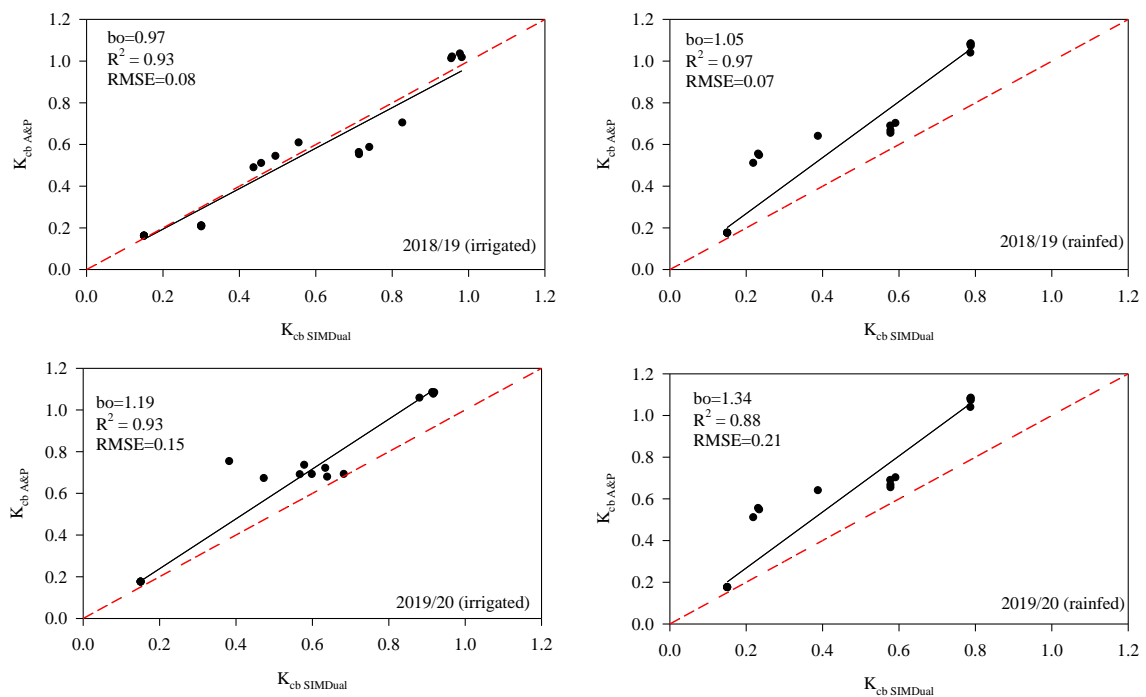
1           The seasonal  $ET_{c \text{ act}}$  in rainfed soybean was a response to the water available in  
2 the root zone. In the 2018/19 crop season, a more uniform distribution of rainfall was  
3 observed, from the mid to end season, which impacts crop evapotranspiration. In the  
4 2019/20 growing season, by contrast, a lack of rainfall was observed during the mid and  
5 end season. When soil water stress occurs during the vegetative stage, plants are induced  
6 to develop more roots to increase water uptake. As the ASW dropped below the RAW  
7 line, the  $ET_{c \text{ act}}$  was always lower than the  $ET_c$ , suggesting that water stress occurred. A  
8 rapid decline in water content was observed for all MGs, in both seasons, from the  
9 beginning of the mid to end season, due to the greatest soil water depletion in the soil  
10 layers below. From the planting date until the full flowering stage, the soil water  
11 dynamics hadn't differed significantly in irrigated and rainfed treatments, indicating that  
12 the soil water uptake was restricted to the topsoil layer.

13

14 *Validation of soybean crop coefficients ( $K_{cb}$  and  $K_c$ ) from fraction of ground covered and*  
15 *plant height using field observation and soil water balance modelling*

16           The crop coefficients derived from the A&P approach ( $K_{cb \text{ A\&P}}$  and  $K_{c \text{ A\&P}}$ ) using  
17 field observations of  $fc$  and  $h$  adjusted to local climate conditions were validated against  
18 the crop coefficients calibrated and validated by the SIMDualKc model ( $K_{cb \text{ SIMDual}}$  and  
19  $K_{c \text{ SIMDual}}$ ) and the results are presented in Figure 6 (and Table 1 in final discussion). It  
20 should be noted that the  $K_{cb}$  derived from the A&P approach are not standard values,  
21 being, therefore, the actual values since, in practice, the crop is rarely growing in optimal  
22 development conditions (which is the case of the standard  $K_{cb}$  and  $K_c$ ), that is, plant  
23 height, the fraction of ground shades by the vegetation and stomatal conductance are  
24 affected by the current condition of the crop (PEREIRA et al., 2021a). The relationship  
25 between  $K_{cb}$  and LAI is generally a quadratic function for maize, sorghum, and wheat

1 because LAI would recess with soil water stress, but TROUT & DEJONG (2018) found  
 2 linear fits between  $f_c$  and  $K_{cb}$  before mid-season for maize i.e., before the ground surface  
 3 were 100% shaded, which also was found in the current study (see the final discussion).  
 4 The FAO56 introduced an approach relative to  $K_c$  and  $K_{cb}$  during mid-season, under full  
 5 covered conditions, or when  $LAI > 3.0$  ( $K_{cb \text{ full}}$ ), because during the mid and late season,  
 6  $K_{cb}$  is the main component of  $K_c$ . However, in non-standard conditions, crop stomatal  
 7 control by the vegetation occurs, which reduces crop transpiration, as the canopy cover  
 8 less the soil and plant height has reached the peak around stage R3.5, when the pod  
 9 development starts, as also observed by PAYERO et al. (2005).

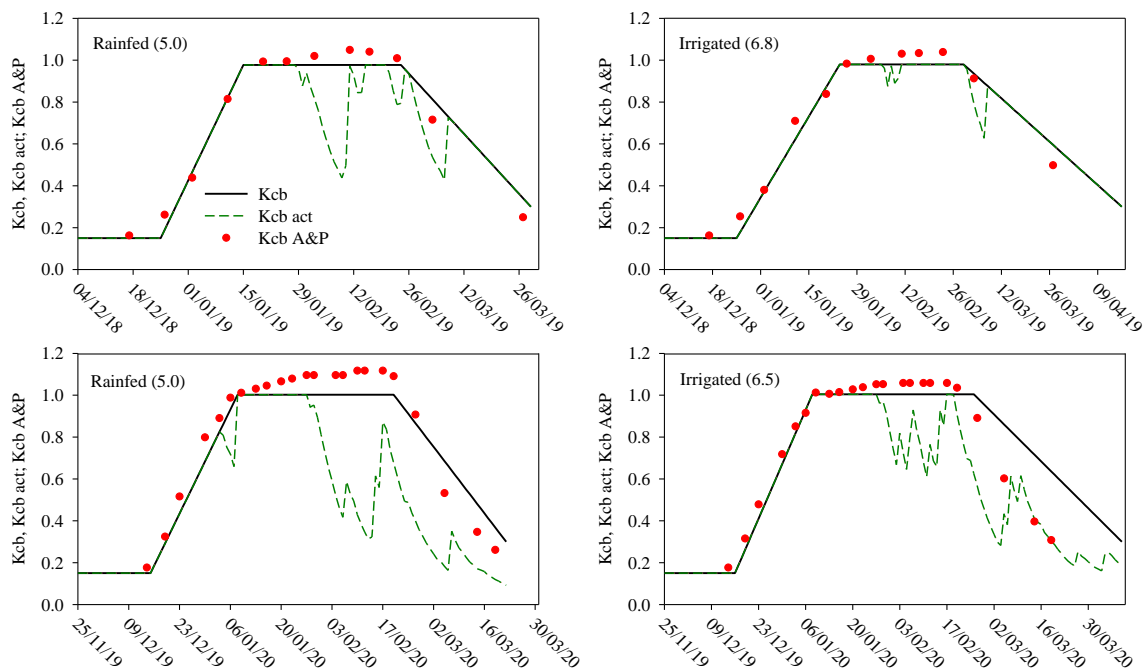


10

11 Figure 6. Linear regression forced through the origin comparing  $K_{cb \text{ A\&P}}$  values (derived  
 12 from equations 2 to 5) with  $K_{cb \text{ SIMDual}}$  for several soybean maturity groups, irrigated and  
 13 rainfed, during the 2018/19 and 2019/20 growing seasons. Depicted is the 1:1 line. The  
 14 regression coefficient forced through origin ( $b_0$ ); de determination coefficient ( $R^2$ ) and  
 15 de root mean square error (RMSE) are also presented inside each graphic.

16

1 In general, the  $K_{cb \text{ A\&P}}$  fitted well against  $K_{cb \text{ SIMDual}}$ , as is presented for two  
 2 selected MG, for the irrigated and rainfed soybean, in two growing seasons, mainly  
 3 during the development and late season (Figure 7). We utilized  $ML=2$  and the best-fit  $kh$   
 4 was 0.2, which is contrary of the value calibrated by PEREIRA et al. (2020a), using a  
 5 data set of short varieties from China and tall varieties from Uruguay. The potential  $K_{cb}$   
 6 calibrated by SIMDualKc using field data of available soil water was  $K_{cb \text{ ini}}=0.15$ ;  $K_{cb}$   
 7  $\text{mid}=1.02$  and  $K_{cb \text{ end}} = 0.3$  (Table 3). Similar values were found by Wei et al. (2015) using  
 8 a short variety, while GIMÉNEZ et al. (2017) derived higher values of  $K_{cb \text{ mid}}$  (1.10) and  
 9  $K_{cb \text{ end}}$  (0.42) for tall varieties.



10

11 Figure 7: Daily variation of the potential basal crop coefficient ( $K_{cb}$ , —), actual basal  
 12 crop coefficient ( $K_{cb \text{ act}}$ , - -) and basal crop coefficient ( $K_{cb \text{ A\&P}}$ , ●) throughout crop  
 13 development of diverse soybean maturity crops. On left: rainfed and on right: irrigated.

14

15 In the  $K_{cb \text{ A\&P}}$  approach, the  $K_{cb}$  for mid-season depends upon the initial  $K_c$ , also  
 16 named  $K_{c \text{ min}}$  (set as 0.15) for further estimation of the  $K_d$  and  $K_{cb \text{ full}}$  (PEREIRA et al.,

1 2021c). However, as the  $K_{c \text{ min}}$  depends upon the presence of crop residues and the  
2 frequency of soil wetness by rainfall events or irrigation, the same authors didn't  
3 recommend a standard value of  $K_{c \text{ ini}}$ . On the other hand, the  $K_{cb \text{ end}}$  derived from the  
4 A&P approach was less than 0.5 for the shortest MG (5.0) in rainfed conditions. In  
5 contrast, for the late MG, under irrigation, the  $K_{cb \text{ end}}$  was higher in 2018/19 ( $K_{cb \text{ end}}=$   
6 0.71), while for an equivalent MG (6.5), in 2018/20, even under irrigation, water stress  
7 was observed, which diminished the  $K_{cb \text{ end}}$  due to the crop senescence acceleration. The  
8 standard  $K_{cb \text{ end}}$  is 0.25 (PEREIRA et al., 2021c), but its value can change slightly with  
9 the harvest time.

10

## 11 **CONCLUSION**

12 The SIMDualKc model also successfully determined the crop coefficients for the  
13 different soybean cultivars:  $K_{cb \text{ ini}}$ ,  $K_{cb \text{ mid}}$ , and  $K_{cb \text{ end}}$ , on 0.15; 1.02, and 0.30,  
14 respectively, which are in agreement with the values referenced in the literature for  
15 soybeans and proved to be appropriate. Therefore, the parameters determined for soybean  
16 can be used in other places in southern Brazil, with environmental conditions similar to  
17 those of this study, with the appropriate adaptations of soil parameters, such as those  
18 related to deep percolation (aD and bD) and Curve Number (CN) for run-off parameters  
19 adjustments.

20 Results of the soil water balance showed differences for the two-crop season, with  
21 higher water use in the 2019/20 growing season, due to the influence of weather  
22 conditions such as more significant solar radiation, lower relative humidity, amount and  
23 frequency of precipitation under the normal climatological, consequently, higher pressure  
24 vapor deficit and higher  $ET_o$ .

25

## 1 ACKNOWLEDGEMENTS

2 To the Federal University of Santa Maria and the Graduate Program in  
3 Agricultural Engineering, represented by the professors and employees who dedicate  
4 themselves to teaching and work for the training of professionals.

## 6 DECLARATION OF CONFLICT OF INTEREST

7 The authors declare no conflict of interest.

## 9 AUTHORS' CONTRIBUTIONS

10 All authors contributed equally for the conception and writing of the manuscript.

## 11 REFERENCES

12 ABRAHÃO, G. M.; COSTA, M. H. Evolution of rain and photoperiod limitations on the  
13 soybean growing season in Brazil: The rise (and possible fall) of double-cropping  
14 systems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 256–257 (2018) 32–45.  
15 <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.031>.

16  
17 ALLEN, R.G. et al. **Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water**  
18 **requirements**. Rome, Italy, 1998. 300p. (FAO irrigation and drainage paper 56).

19  
20 ALLEN, R.G. et al. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with  
21 Internalized Calibration (METRIC)-Model. **Journal of Irrigation and Drainage**  
22 **Engineering**, v.133, n.4, p.380-394, 2007. Available from:  
23 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380)). Accessed: Aug. 26,  
24 2022. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380).

25  
26 ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S. Estimating crop coefficients from fraction of ground  
27 cover and height. **Irrigation Science**, v.28, n.1, p.17-34, 2009. Available from:  
28 <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0182-z>. Accessed: Sep. 02, 2022. doi:  
29 10.1007/s00271-009-0182-z.

30  
31 ANDA, A. et al. Yield features of two soybean varieties under different water supplies  
32 and field conditions. **Field Crops Research**, v.245, p.107673, 2020. Available from:

- 1 <<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107673>>. Accessed: Aug. 22, 2022. doi:  
2 10.1016/j.fcr.2019.107673.  
3
- 4 ANAPALLI, S. S. et al. Quantifying soybean evapotranspiration using an eddy  
5 covariance approach. **Agric. Water Manag.** 209, p.228-239, 2018.  
6 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.023>  
7
- 8 AVILA, V. **Balanço hídrico do solo e partição da evapotranspiração de soja, milho e**  
9 **feijão submetidos a irrigação deficitária no sul do Brasil.** 2016. Dissertação  
10 (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de  
11 Santa Maria.  
12
- 13 AYDINSAKIR, K. et al. Yield and Quality Characteristics of Drip-Irrigated Soybean  
14 under Different Irrigation Levels. **Agronomy Journal**, v.110, n.4, p.1473–1481, 2018.  
15 Available from: <<https://doi.org/10.2134/agronj2017.12.0748>>. Accessed: Aug. 18, 2022.  
16 doi: 10.2134/agronj2017.12.0748.  
17
- 18 BATTISTI, R et al. Soybean Yield Gap in the Areas of Yield Contest in Brazil.  
19 **International Journal of Plant Production**, v.12, p.159-168, 2018. Available from:  
20 <<https://doi.org/10.1007/s42106-018-0016-0>>. Accessed: Aug. 12, 2022. doi:  
21 10.1007/s42106-018-0016-0.
- 22 CANDONGAN, B.N. et al. Yield, quality and crop water stress index relationships for  
23 deficit-irrigated soybean [*Glycine max* (L.) Men.] in sub-humid climatic conditions.  
24 **Agricultural Water Management**, v.118, p.113-121, 2013. Available from:  
25 <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.021>>. Accessed: Sep. 14, 2022. doi:  
26 10.1016/j.agwat.2012.11.021.  
27
- 28 CASSMAN, K.G. et al. Crop Yield Potential, Yield Trends, and Global Food Security in  
29 a Changing Climate. In: HILLEL, D.; ROSENZWEIG, C. **Handbook of Climate**  
30 **Change and Agroecosystems: Impacts, Adaptation, and Mitigation.** London :  
31 Imperial College Press, 2010. cap.3, p.37-51.  
32
- 33 CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Boletim da Safra de**  
34 **Grãos.** Brasília: Safra 2021/22: 12º Levantamento, 2022. 88p. (Boletim Técnico, 12).  
35
- 36 CRUSIOL, L.G.T. et al. Yield Prediction in Soybean Crop Grown under Different Levels  
37 of Water Availability Using Reflectance Spectroscopy and Partial Least Squares  
38 Regression. **Remote Sensing**, v.13, n.5, p.977, 2021. Available from:  
39 <<https://doi.org/10.3390/rs13050977>>. Accessed: Sep. 03, 2022. doi:  
40 10.3390/rs13050977.  
41
- 42 DOORENBOS, J., KASSAM, A.H. **Yield response to water.** In: FAO Irrigation and  
43 Drainage Paper 33. FAO, Rome, p.193, 1979.



- 1 DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for Predicting Crop Water**  
2 **Requirements**. In: FAO Irrigation and Drainage Paper 24. FAO, Rome, Italy, p.144,  
3 1977.
- 4
- 5 FANDIÑO, M. et al. Using the dual-Kc approach to model evapotranspiration of albarin~  
6 o vineyards (*Vitis vinifera* L. cv. albarin~ o with consideration of active ground cover.  
7 **Agricultural Water Management**, v.112, n.9, p.75-87, 2012. Available from:  
8 <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.06.008>>. Accessed: Sep. 08, 2022. doi:  
9 10.1016/j.agwat.2012.06.008.
- 10
- 11 FEHR, W.; CAVINESS, C. Stages of soybean development. **Iowa State University**  
12 **Digital Repository**, Special Report. 87, 1977. Available from:  
13 <<https://core.ac.uk/download/pdf/83024475.pdf>>. Accessed: Aug. 06, 2022.
- 14
- 15 GAJIC, B. et al. Effect of irrigation regime on yield, harvest index and water productivity  
16 of soybean grown under different precipitation conditions in a temperate environment.  
17 **Agricultural Water Management**, v.210, p.224-231, 2018. Available from:  
18 <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.002>>. Accessed: Sep. 12, 2022. doi:  
19 10.1016/j.agwat.2018.08.002.
- 20
- 21 GAVIOLI, E.A., 2013. Explanations for the rise of soybean in Brazil. In: Board, J. (Ed.),  
22 A Comprehensive Survey of International Soybean Research - Genetics, Physiology,  
23 Agronomy and Nitrogen Relationships. **InTech**, pp. 1–26. [http://dx.doi.org/10.5772/](http://dx.doi.org/10.5772/45867)  
24 45867.
- 25
- 26 GIACOMELI, R. et al. Improving irrigation, crop, and soil management for sustainable  
27 soybean production in Southern Brazilian lowlands. **Scientia Agricola**, v.79, n.6, 2022.  
28 Available from: <<https://doi.org/10.1590/1678-992X-2021-0115>>. Accessed: Aug. 28,  
29 2022. doi: 10.1590/1678-992X-2021-0115.
- 30
- 31 GIMÉNEZ, L. et al. Water Use and Yield of Soybean under Various Irrigation Regimes  
32 and Severe Water Stress. Application of AquaCrop and SIMDualKc Models. **Water**, v.9,  
33 n.6. p.393, 2017. Available from: <<https://doi.org/10.3390/w9060393>>. Accessed: Aug.  
34 06, 2022. doi: 10.3390/w9060393.
- 35
- 36 GORELICK, N. et al 2017. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for  
37 everyone. **Remote Sens. Environ.**202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- 38
- 39 HUANG, M. et al. Water–yield relationships and optimum water management for winter  
40 wheat in the Loess Plateau of China. **Irrigation Science**, v.23, p.47-54. 2004. Available  
41 from: <<https://doi.org/10.1007/s00271-004-0092-z>>. Accessed: Sep. 12, 2022. doi:  
42 10.1007/s00271-004-0092-z.

- 1 IRMAK, S.; SHARMA, V. Large-scale and long-term trends and magnitudes in irrigated  
2 and rainfed maize and soybean water productivity: grain yield and evapotranspiration  
3 frequency, crop water use efficiency, and production functions. **Transactions of the**  
4 **ASABE**, v.58, n.1, p.103-120, 2015. doi: 10.13031/trans.58.10784.
- 5
- 6 JUMRANI, K.; BHATIA, V. S. Identification of drought tolerant gen-otypes using  
7 physiological traits in soybean. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v.25,  
8 p.697-71, 2019. Available from: <<https://doi.org/10.1007/s12298-019-00665-5>>.  
9 Accessed: Sep. 02, 2022. doi: 10.1007/s12298-019-00665-5.
- 10
- 11 KOESTER, R. P. et al. Has photosynthetic capacity increased with 80 years of soybean  
12 breed-ing? An examination of historical soybean cultivars. **Plant, Cell & Environment**,  
13 v.39, n.5, p.1058-1067, 2015. Available from: <<https://doi.org/10.1111/pce.12675>>.  
14 Accessed: Sep. 02, 2022. doi: 10.1111/pce.12675.
- 15
- 16 KOTTEK, M. et al. World Map of Köppen-Geiger climate classification updated.  
17 **Meteorologische Zeitschrift**, v.15, n.3, p.259-263, 2006. Available from:  
18 <[https://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/15/55034/World\\_Map\\_of\\_the\\_Koppe](https://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/15/55034/World_Map_of_the_Koppen_Geiger_climate_classification?af=crossref)  
19 [n\\_Geiger\\_climate\\_classification?af=crossref](https://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/15/55034/World_Map_of_the_Koppen_Geiger_climate_classification?af=crossref)>. Accessed: Aug. 28, 2022. doi: 10.1127/0941-  
20 2948/2006/0130.
- 21
- 22 KUMAR, V. et al. **Crop water use and stage-specific crop coefficients for irrigated**  
23 **cotton in the mid-south, United States**. *Agric. Water Manage.* 156, 63–69.  
24 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.022>. 2015.
- 25
- 26 LEGATES, D.; MCCABE, G. Evaluating the use of goodness of fit measures in  
27 hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v.35,  
28 p.233-241, 1999. Available from: <<https://doi.org/10.1029/1998WR900018>>. Accessed:  
29 Aug. 27, 2022. doi: 10.1029/1998WR900018.
- 30
- 31 LIU, Y.; DAI, L. Modelling the impacts of climate change and crop management  
32 measures on soybean phenology in China. **Journal of Cleaner Production**, v.262,  
33 p.121271, 2020. Available from: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121271>>.  
34 Accessed: Sep. 14, 2022. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121271.
- 35
- 36 LIU, Y. et al. Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils:  
37 Parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation.  
38 **Agricultural Water Management**, v.84, n.1 p.27-40, 2006. Available from:  
39 <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.01.018>>. Accessed: Sep. 02, 2022. doi:  
40 10.1016/j.agwat.2006.01.018.
- 41

- 1 MANNERING, J.V.; MEYER, L.D. The effect of various rates of surface mulch an  
2 infiltration and erosion. **Soil Science of American Proceeding**, v.27, n.1, p.84-86, 1963.  
3 Available from: <<https://doi.org/10.2136/sssaj1963.03615995002700010029x>>.  
4 Accessed: Aug. 19, 2022. doi: 10.2136/sssaj1963.03615995002700010029x.
- 5
- 6 MARTINS, J.D. et al. Dual crop coefficients for maize in southern Brazil: Model testing  
7 for sprinkler and drip irrigation and mulched soil. **Biosystems Engineering**, v.115,  
8 p.291-310, 2013. Available from:  
9 <<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.03.016>>. Accessed: Aug. 13, 2022. doi:  
10 10.1016/j.biosystemseng.2013.03.016.
- 11
- 12 MEDEIROS, G.A. et al. The influence of crop canopy on evapotranspiration and crop  
13 coefficient of beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Agric. Water Manage.** 9 (3), 211–224.  
14 2001.
- 15
- 16 MEDEIROS, G.A. et al., Growth, development, and water consumption of irrigated bean  
17 crop related to growing degree-days on different soil tillage systems in Southeast Brazil.  
18 **Int. J. Agron.**, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/8065985>. 2016.
- 19
- 20 MESQUITA, R.O. et al. Physiological approach to decipher the drought tolerance of a  
21 soybean genotype from Brazilian Savana. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.151,  
22 p.132-143, 2020. Available from: <<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.03.004>>.  
23 Accessed: Aug. 29, 2022. doi: 10.1016/j.plaphy.2020.03.004.
- 24
- 25 MONTOYA, F. et al. Effects of irrigation regime on the growth and yield of irrigated  
26 soybean in temperate humid climatic conditions. **Agricultural Water Management**,  
27 v.193, p.30-45, 2017. Available from: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.001>>.  
28 Accessed: Sep. 02, 2022. doi: 10.1016/j.agwat.2017.08.001.
- 29
- 30 MORIASI, D.N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of  
31 accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v.50, p.885-900, 2007.
- 32
- 33 MUSICK, J. et al. Water–yield relationship for irrigation and dryland wheat in the U.S.  
34 southern plains. **Agronomy Journal**, v.86, p.980-986, 1994. Available from:  
35 <<https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600060010x>>. Accessed: Sep. 18,  
36 2022. doi: 10.2134/agronj1994.00021962008600060010x.
- 37
- 38 NASH J.E.; SUTCLIFFE J.V. River flow forecasting through conceptual models. 1. A  
39 discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v.10, p.282- 290, 1970. Available from:  
40 <[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)>. Accessed: Sep. 08, 2022. doi:  
41 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- 42

- 1 NUNES, A.C. et al. Aspectos agronômicos de plantas de soja submetidas a déficit  
2 hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.20, n.7, p. 654-659,  
3 2016. Available from: <<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n7p654-659>>.  
4 Accessed: Sep. 10, 2022. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v20n7p654-659.  
5
- 6 ODHIAMBO, L.; IRMAK, S. Relative Evaporative Losses and Water Balance in  
7 Subsurface Drip and Center Pivot-Irrigated Soybean Fields. **Journal of Irrigation and**  
8 **Drainage Engineering**, v.141, n.11, p.1, 2015. Available from:  
9 <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000907](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000907)>. Accessed: Sep. 19, 2022. doi:  
10 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000907.  
11
- 12 PAÇO, T.A. et al. The dual crop coefficient approach using a density factor to simulate  
13 the evapotranspiration of a peach orchard: SIMDualKc model vs. eddy covariance  
14 measurements. **Irrigation Science**, v.30, n.2, p.115-1263, 2012. Available from:  
15 <<https://doi.org/10.1007/s00271-011-0267-3>>. Accessed: Sep. 04, 2022. doi:  
16 10.1007/s00271-011-0267-3.  
17
- 18 PAREDES, P. et al. Partitioning evapotranspiration, yield prediction and economic  
19 returns of maize under various irrigation management strategies. **Agricultural Water**  
20 **Management**, v.135, p.27-39, 2014. Available from:  
21 <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.12.010>>. Accessed: Aug. 28, 2022. doi:  
22 10.1016/j.agwat.2013.12.010.  
23
- 24 PAREDES, P. et al. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water,  
25 soil evaporation, biomass and yield of soybeans in North China Plain. **Agricultural**  
26 **Water Management**, v.152, p.57-71, 2015. Available from:  
27 <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.12.007>>. Accessed: Aug. 22, 2022. doi:  
28 10.1016/j.agwat.2014.12.007.  
29
- 30 PAYERO, J.O. et al. Response of soybean to deficit irrigation in the semi-arid  
31 environment of west-central Nebraska. **Transactions of the ASAE**, v.48, p.2189-2203,  
32 2005.  
33
- 34 PEREIRA, L.S. et al. Modeling malt barley water use and evapotranspiration  
35 partitioning in two contrasting rainfall years. Assessing AquaCrop and SIMDualKc  
36 models. **Agricultural Water Management**, v.159, p.239-254, 2015. Available from:  
37 <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.006>>. Accessed: Aug. 14, 2022. doi:  
38 10.1016/j.agwat.2015.06.006.  
39
- 40 PEREIRA, L.S. et al. Prediction of crop coefficients from fraction of ground cover and  
41 height. Background and validation using ground and remote sensing data. **Agricultural**  
42 **Water Management**, v.241, p.106197, 2020. Available from:

- 1 <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106197>>. Accessed: Aug. 12, 2022. doi:  
2 10.1016/j.agwat.2020.106197.  
3
- 4 PINNAMANENI, S. R. et al. Water Use Efficiencies of Different Maturity Group  
5 Soybean Cultivars in the Humid Mississippi Delta. *Water*, v.13, p.1496, 2021.  
6 <https://doi.org/10.3390/w13111496>  
7
- 8 POPOVA,Z.; PEREIRA, L.S. Modeling for maize irrigation scheduling using long term  
9 experimental data from Plovdiv region, Bulgaria. ***Agricultural Water Management***,  
10 v.98, p.675-683, 2013. Available from: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.11.009>>.  
11 Accessed: Sep. 27, 2022. doi: 10.1016/j.agwat.2010.11.009.  
12
- 13 QIU, R. et al. Assessing the SIMDualKc model for estimating evapotranspiration of hot  
14 pepper grown in a solar greenhouse in Northwest China. ***Agricultural Systems***, v.138,  
15 p.1-9, 2015. Available from: <<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.05.001>>. Accessed:  
16 Aug. 18, 2022. doi: 10.1016/j.agsy.2015.05.001.  
17
- 18 RITCHIE, J.T. **Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete**  
19 **cover**. *Water Resour. Res.* 8, 1204–1213. 1972.  
20
- 21 RODRIGUES, L.N.; PRUSKI, F.F. Fundamentos e benefícios do sistema de integração  
22 lavoura-pecuária-floresta para os recursos hídricos. In: BUNGENSTAB, D.J. et al. **ILPF:**  
23 **inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2019.  
24 Cap.13, p.181-194.  
25
- 26 ROSA, R.D. et al. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive  
27 software 1. Background and Computational Strategy. ***Agricultural Water Management***,  
28 v.103, p.8-24, 2012a. Available from: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.10.013>>.  
29 Accessed: Sep. 02, 2022. doi: 10.1016/j.agwat.2011.10.013.  
30
- 31 ROSA, R.D. et al. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive  
32 software: 2. Model testing. ***Agricultural Water Management***, v.103, p.62-77, 2012b.  
33 Available from: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.10.018>>. Accessed: Sep. 11, 2022.  
34 doi: 10.1016/j.agwat.2011.10.018.  
35
- 36 SENTELHAS, P.C. et al. The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and  
37 possible solutions for sustainable production. ***The Journal of Agricultural Science***,  
38 v.153, n.8, p.1934-1411, 2015. Available from:  
39 <<https://doi.org/10.1017/S0021859615000313>>. Accessed: Sep. 10, 2022. doi:  
40 10.1017/S0021859615000313.  
41

- 1 SCHWALBERT, R. A. et al. Satellite-based soybean yield forecast: Integrating machine  
2 learning and weather data for improving crop yield prediction in southern Brazil.  
3 **Agricultural and Forest Meteorology**, v.284, p.108886, 2020.  
4 <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107886>  
5
- 6 SIAHPOOSH, M.; DEHGHANIAN, E. Water use efficiency, transpiration efficiency,  
7 and uptake efficiency of wheat during drought. **Agronomy Journal**, v.104, p.1238-1243,  
8 2012. Available from: <<https://doi.org/10.2134/agronj2011.0320>>. Accessed: Sep. 18,  
9 2022. doi: 10.2134/agronj2011.0320.  
10
- 11 SILVA, T.A. et al. Efficiency of technologies to live with drought in agricultural  
12 development in Brazil's semi-arid regions. **Journal of Arid Environments**, v.192,  
13 p.104538, 2021. Available from: <<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104538>>.  
14 Accessed: Sep. 18, 2022. doi: 10.1016/j.jaridenv.2021.104538Get.  
15
- 16 SINGER, J. et al. Contrasting methods for estimating evapotranspiration in soybean.  
17 **Agricultural Water Management**, v.98, p.157-163, 2010. Available from:  
18 <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.08.014>>. Accessed: Sep. 10, 2022. doi:  
19 10.1016/j.agwat.2010.08.014.  
20
- 21 SINGH, R. et al. Estimation of water requirement for soybean (Glycine max) and wheat  
22 (Triticum aestivum) under vertisols of Madhya Pradesh. **Indian Journal of Agricultural  
23 Sciences**, v.84, n.2, p.190-7, 2014. Available from:  
24 <[https://www.researchgate.net/publication/260297553\\_Estimation\\_of\\_water\\_requirement  
25 for\\_soybean\\_Glycine\\_max\\_and\\_wheat\\_Triticum\\_aestivum\\_under\\_vertisols\\_of\\_Madhy  
26 a\\_Pradesh](https://www.researchgate.net/publication/260297553_Estimation_of_water_requirement_for_soybean_Glycine_max_and_wheat_Triticum_aestivum_under_vertisols_of_Madhy_a_Pradesh)>. Accessed: Sep. 21, 2022. Epub 07-Oct-2013.  
27
- 28 STEDUTO, P. et al. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water:  
29 I. Concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**, v.101, p.426-437, 2009.  
30 Available from: <<https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>>. Accessed: Sep. 22, 2022.  
31 doi: 10.2134/agronj2008.0139s.  
32
- 33 STEDUTO, P. et al. **Crop yield response to water**. Rome, Italy, 500p. 2012. (FAO  
34 Irrigation and Drainage Paper 66).  
35
- 36 STEWART, J.I. et al. **Optimizing Crop Production Through Control of Water and  
37 Salinity Levels in the Soil**. Utah Water Research Laboratory, USA, 191p. 1977.  
38 (Reports. Paper 67).  
39
- 40 STRECK, E.V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul (2 ed.)**. Porto Alegre: Emater/RS,  
41 2008. 222p.  
42

- 1 TAGLIAPIETRA, E. L. et al. Biophysical and management factors causing yield gap in  
2 soybean in the subtropics of Brazil. **Agronomy Journal**, v. 113, p. 1881-1894, 2021.  
3 DOI: 10.1002/agj2.20586.
- 4
- 5 THOMAS, J.F.; RAPER, C.D. Photoperiod and Temperature Regulation of Floral  
6 Initiation and Anthesis in Soya Bean. *Ann. Bot.* 1983, 51, 481–489.
- 7
- 8 TONG, X. et al. Water stress con-trols on carbon flux and water use efficiency in a  
9 warm-temperate mixed plantation. **Journal of Hydrology**, v.571, p.669-678, 2019.  
10 Available from: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.014>>. Accessed: Sep. 02,  
11 2022. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.02.014.
- 12
- 13 UMBURANAS, R.C. et al. Changes in soybean cultivars released over the past 50 years  
14 in southern Brazil. **Scientific Reports**, v.12, n.508, p.1-14, 2022. Available from:  
15 <<https://doi.org/10.1038/s41598-021-04043-8>>. Accessed: Sep. 21, 2022. doi:  
16 10.1038/S41598-021-04043-8.
- 17
- 18 VENANCIO, L, P. et al. Mapping within-field variability of soybean evapotranspiration  
19 and crop coefficient using the Earth Engine Evaporation Flux (EEFlux) application. **Plos**  
20 **One**, v. 15. n.7, p. 1-15, 2020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235620>
- 21
- 22 WEI Z. et al. Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of soybean in  
23 North China Plain. **Agricultural Water Management**, v.147, p.43-53, 2015. Available  
24 from: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.004>>. Accessed: Aug. 23, 2022. doi:  
25 10.1016/j.agwat.2014.05.004.
- 26
- 27 ZANON, A.J. et al. Climate and Management Factors Influence Soybean Yield Potential  
28 in a Subtropical Environment. **Agronomy Journal**, v.108, p.1447-1454, 2016. Available  
29 from: <<https://doi.org/10.2134/agronj2015.0535>>. Accessed: Sep. 12, 2022.  
30 doi:10.2134/agronj2015.0535.
- 31
- 32 ZHAO, N.N. et al. Dual crop coefficient modelling applied to the winter wheat summer  
33 maize crop sequence in North China Plain: basal crop coefficients and soil evaporation  
34 component. **Agricultural Water Management**, v.117, p.93-105, 2013. Available from:  
35 <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.008>>. Accessed: Sep. 14, 2022. doi:  
36 10.1016/j.agwat.2012.11.008.
- 37
- 38 ZHANG, H. et al. 2015. Satellite-based crop coefficient and regional water use estimates  
39 for Hawaiian sugarcane. **Field Crops Res.** 180, 143–154.
- 40
- 41
- 42

## CAPÍTULO II (Artigo Científico)

### Partição da evapotranspiração e predições do rendimento de diversos grupos de maturidade da soja sob irrigação e sequeiro

### Partitioning of evapotranspiration and yield predictions of different soybean maturity groups under irrigation and rainfall

Ticiano Franois Magalhães<sup>1</sup>

#### RESUMO

A evapotranspirao da cultura ( $ET_c$ )   a principal fonte de perda de água pelas plantas. Este trabalho teve o objetivo de determinar a evapotranspirao da cultura ( $ET_{c\ act}$ ), estimar o rendimento de soja e determinar o fator de rendimento ( $K_y$ ). Dois experimentos foram conduzidos, em Santa Maria (UFSM), nos anos agrícolas de 2018/19 e 2019/20, que foram arranados em esquemas bifatoriais, sendo o fator A o manejo da irrigao (irrigada e sequeiro) e o fator B, os diferentes grupos de maturao relativa (GMR). O modelo SIMDual $K_c$  foi utilizado para simular o balano hídrico do solo, combinado com funoes de rendimento. Nos dois anos os maiores valores da  $E_s$  foram observados nos estádios iniciais da cultura, em média 77% da  $ET_c$ , já os valores máximos da  $T_c$  foram observados no período intermediário do ciclo de desenvolvimento, em média de 97% da  $ET_c$ . Os tratamentos sob sequeiro apresentaram reduo média de 8% em 2018/19 e 14,8% em 2019/20 na produtividade. Os maiores valores de  $K_y$  foram obtidos para as cultivares de soja de GMR 5 e 5,5 o que demonstra que especial ateno deve ser dada às cultivares de menor GMR.

**Palavras-chave:** irrigao, transpirao da cultura, frao de cobertura do solo e evaporao do solo.



1

2 **ABSTRACT**

3 Crop evapotranspiration ( $ET_c$ ), which is the main source of water loss by plants, is often  
4 compensated only by rainfall, therefore, supplementary irrigation is required to ensure  
5 stability of soybean production. Thus, the objective of this work was to determine the  
6 crop evapotranspiration ( $ET_{c\ act}$ ) and to estimate the soybean yield, under irrigated and  
7 rainfed conditions, and to determine the yield factor ( $K_y$ ). Two experiments were  
8 conducted, in Santa Maria (UFSM), in the agricultural years 2018/19 and 2019/20, which  
9 were arranged in two-factor schemes, with factor A being irrigation management  
10 (irrigated and rainfed) and factor B, the different groups of relative maturation (GMR).  
11 The SIMDual $K_c$  model, which computes the variation of crop evapotranspiration ( $ET_c$ )  
12 during the cycle, fractionating it into  $T_{c\ act}$  and  $E_s$ , was used to simulate soil water  
13 balance, combined with yield functions. Irrigations were performed when the water  
14 content in the soil in the region of distribution of the root system of the plants reached  
15 values below 60% of the total available water (TAW). In the two years, the highest values  
16 of  $E_s$  were observed in the initial stages of the crop, on average 77% of  $ET_c$  due to  
17 frequent irrigation and lack of soil cover by the canopy of the plants, whereas the  
18 maximum values of  $T_c$  were observed in the intermediate period of the cycle  
19 development, averaging 97% of  $ET_c$ . The treatments under rainfed showed an average  
20 reduction of 8% in 2018/19 and 14.8% in 2019/20 in productivity. The highest  $K_y$  values  
21 were obtained for soybean cultivars with MG 5 and 5.5, which demonstrates that special  
22 attention should be given to cultivars with lower MG.

23 **Keywords:** irrigation, crop transpiration, fraction ground cover and soil evaporation.

24

## 1 INTRODUÇÃO

2 Desde a sua introdução no Brasil, a soja (*Glycine max* L Merrill) tem sido  
3 conduzida com alto nível tecnológico em todas as suas operações, constituindo-se em  
4 uma “commodity” de grande importância social e comercial para o desenvolvimento da  
5 agricultura brasileira, sendo cultivada em todas as regiões, até mesmo naquelas  
6 consideradas inaptas para o cultivo pelo zoneamento agrícola, pelo tipo de solo ou risco  
7 climático. Os responsáveis pela grande variabilidade interanual da produtividade de soja  
8 (BERGAMASCHI et al., 2007), além dos fatores meteorológicos, são os fatores  
9 relacionados a um manejo adequado do solo e das plantas.

10 A soja é cultivada em uma ampla distribuição geográfica, entretanto, dentro de um  
11 mesmo GMR, a adaptabilidade é restringida a uma estreita faixa de latitude (SONG et al.,  
12 2019), o que reforça a importância da adequação da época de semeadura ao grupo de  
13 maturação relativa (GMR). Quando plantada em regiões de adaptação ideal, a soja exibe  
14 ótimas características agronômicas e potencial de rendimento próximo do ideal. Além  
15 disso, a utilização de irrigação que disponibilize a quantidade de água no momento  
16 correto para a cultura, permite que as plantas expressem o máximo potencial de  
17 produtividade, inferindo-se como importantes elementos a serem previamente  
18 considerados no sucesso ou insucesso da cultura. Em contraste, pode apresentar inibição  
19 no crescimento ou atraso na maturação, o que resulta em baixo rendimento quando  
20 semeadas fora das condições ótimas (BOYER et al., 2015), devido aos efeitos ambientais,  
21 como a temperatura e fotoperíodo.

22 Assim, determinar o período ótimo de crescimento e desenvolvimento de cada  
23 GMR vem a ser essencial, tanto para as pesquisas, como para os produtores (ZHANG et  
24 al., 2017) para que se possa contornar ou minimizar os efeitos do ambiente sobre o  
25 rendimento da soja, já que a redução da disponibilidade de água no solo está relacionada

1 à redução da capacidade fotossintética das plantas, condutância estomática, área foliar,  
2 levando às perdas de rendimento (JUMRANI & BHATIA, 2019; KOESTER et al., 2015;  
3 TONG et al., 2019). CASSMAN et al. (2010) atentaram para a existência de uma lacuna  
4 entre o rendimento potencial e o real, pois a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ), que é a  
5 principal fonte de perda de água é compensada apenas pela chuva, na maior parte dos  
6 cultivos da soja. Uma ampla gama de fatores pode impactar a  $ET_c$  (PAYERO et al.,  
7 2005), sobretudo as práticas de manejo e as condições climáticas. Assim, o momento de  
8 ocorrência do déficit hídrico e os impactos desse nas relações água-produção precisam  
9 ser rigorosamente quantificados, para se desenvolver práticas de manejo que permitam o  
10 uso eficiente da água da chuva e da irrigação (PEREIRA et al., 2020).

11 A avaliação dos impactos de diferentes estratégias de manejo da água no  
12 rendimento da soja pode ser feita através de modelagem, combinando o balanço hídrico  
13 do solo (SWB) com funções de rendimento (PAREDES et al., 2015). Um dos SWB  
14 destacados na literatura é o modelo SIMDual $K_c$  (ROSA et al., 2012), o qual utiliza a  
15 metodologia FAO56 na determinação da  $ET_c$  a partir da  $ET_o$  e de um coeficiente de  
16 cultivo ( $K_c$ ), particularmente o coeficiente de cultura dual (PEREIRA et al., 2020),  
17 devido a relevância em se separar a transpiração da cultura ( $T_c$ ) da evaporação do solo  
18 ( $E_s$ ), sobretudo em ambientes com frequência de umedecimento por chuva ou irrigação.  
19 A determinação da  $ET_c$  e  $T_c$  nas condições reais de campo ( $ET_{c\ act}$  e  $T_{c\ act}$ ) permite estimar  
20 o déficit de evapotranspiração em relação às condições ótimas de cultivo (PAREDES et  
21 al., 2015). Esses valores, quando associados a modelos água-produção (STEWART et al.,  
22 1977), possibilitam que se estime as perdas de rendimento em função do déficit hídrico,  
23 em qualquer estágio de desenvolvimento (PAREDES et al., 2014), assumindo que o  
24 rendimento seja linearmente dependente do déficit evapotranspiratório.

1           A quantificação acurada da  $ET_c$  é vital para estimar o rendimento e a resposta da  
2 cultura ao uso da água ou à quantidade de água aplicada via irrigação. De acordo com  
3 IRMAK (2017), quando nenhum outro fator de manejo for limitante, a demanda de água  
4 da soja (i.e, a  $ET_c$ ) varia com as características do dossel, a fração de solo sombreada, o  
5 grupo de maturidade relativa (GMR) e a época de semeadura. Portanto, quantificar o  
6 requerimento hídrico nos diferentes estádios e o impacto de diferentes níveis de stress em  
7 cada fase no rendimento permite entender melhor a interação água-produção (ANDA et  
8 al., 2020).

9           Com isso, observa-se a crescente necessidade de obter estimativas mais precisas  
10 da produtividade da soja antes da colheita (CRUSIOL et al. 2021), auxiliando no melhor  
11 gerenciamento dos processos agronômicos e de logística pelos órgãos governamentais e  
12 corporativos. Assim, os principais objetivos desse estudo foram: (i) analisar os  
13 componentes do balanço hídrico e partição da evapotranspiração usando o modelo  
14 SIMDual $K_c$ ; (ii) combinar o modelo SimDual $K_c$  com o modelo água-produção Stewart  
15 para prever o rendimento da cultura da soja em situação de déficit hídrico; (iii)  
16 determinar o fator de rendimento ( $K_y$ ) e sua relação com a produtividade da água.

17

## 18 **MATERIAL E MÉTODOS**

### 19 *Condições edafoclimáticas dos experimentos*

20           Os experimentos foram realizados nas áreas experimentais pertencentes ao  
21 Departamento de Engenharia Rural, da Universidade Federal de Santa Maria (29°43'4"S;  
22 53°43'13"O e altitude de 95 m), durante os anos agrícolas de 2018 a 2021. A região de  
23 Santa Maria apresenta clima caracterizado como "Cfa" subtropical úmido, com  
24 precipitações bem distribuídas ao longo do ano e estações bem definidas, de acordo com  
25 a classificação climática de Köppen-Geiger (KOTTEK et al., 2006). O solo é classificado

1 como Argissolo Vermelho Distrófico típico (STRECK et al., 2008). Amostras de solo  
 2 foram coletadas nos dois anos de experimento para a caracterização físico-hídrica e os  
 3 resultados médios e desvio-padrão estão apresentados na tabela 1. Os dados diários da  
 4 temperatura máxima e mínima do ar (°C), radiação solar global ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ),  $\text{ET}_o$  (mm)  
 5 e precipitação (mm), referentes ao período experimental estão apresentados na Figura 1.

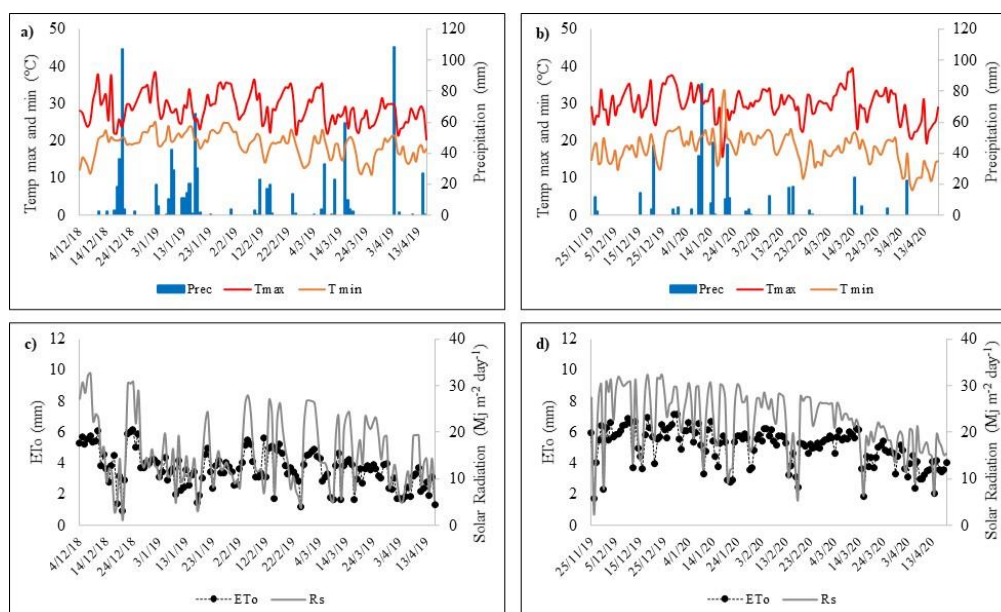
6

7 Tabela 1 - Parâmetros físicos e hidráulicos do solo para as áreas experimentais

Camada (m)	Textura (%)			$\Theta$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )		
	Areia	Silte	Argila	CC	PMP	Saturação
0-0,2	41 (1,5)	36 (1,5)	23 (0,5)	0,35	0,15	0,50
0,2-0,4	40 (1,4)	33 (1,5)	27 (2,5)	0,32	0,16	0,49
0,4-0,6	34 (2,0)	28 (3,0)	38 (2,5)	0,33	0,17	0,50

8  $\theta$  = conteúdo volumétrico ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) de água na CC: Capacidade de campo ( $\theta_{-33} \text{ kPa}$ );9 PMP: Ponto de murcha permanente ( $\theta_{-1500} \text{ kPa}$ );

10



11

12 Figura 1 - Temperatura máxima e mínima do ar e precipitação (mm), sendo a) 2018/19,

13 b) 2019/20 e Evapotranspiração de referência diária ( $\text{ET}_o$ ) e radiação solar ( $\text{MJ}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ), c)

14 2018/19 e d) 2019/20.

15

## 1 *Descrição dos experimentos e delineamento experimental*

2 Os experimentos foram dispostos em esquema fatorial 2x4, sendo o fator A o  
3 manejo da irrigação (irrigada e sequeiro) e o fator B constituído por quatro variedades de  
4 soja, com hábito de crescimento indeterminado, de diferentes Grupos de Maturidade  
5 Relativa (GMR) variando de 5,0 a 6,8. Na safra 2018/19, foram utilizadas as seguintes  
6 variedades (GMR) em três repetições: Raio (5,0), Elite (5,5), Lança (5,8) e Ícone (6,8),  
7 enquanto na safra 2019/20, a duas últimas foram substituídas por Delta (5,9) e compacta  
8 (6,5), em quatro repetições. Todas as variedades eram resistentes ao herbicida de  
9 princípio ativo *glyphosate* e as sementes foram inoculadas com *Bradyrhizobium*  
10 *japonicum* antes da semeadura. Todas as cultivares foram semeadas nos dias 4 de  
11 dezembro e 25 de novembro, em 2018/19 e 2019/20, respectivamente, no espaçamento de  
12 0,45 m entre linhas e densidade de semeadura de 20 e 24 plantas m<sup>-2</sup>, sobre resíduo de  
13 aveia preta (*Avena strigosa*). A adubação e as práticas gerais de manejo da cultura  
14 seguiram as recomendações para a soja no Sul do Brasil.

15

## 16 *Dados observados e medidos a campo*

17 As observações realizadas e medidas a campo para serem utilizadas nas  
18 simulações com o modelo SIMDualK<sub>c</sub> incluem:

19 i. Observação fenológica: em cada parcela duas plantas foram previamente  
20 marcadas e identificadas, três vezes por semana, seguindo a metodologia proposta por  
21 FEHR E CAVINESS (1977); também se avaliou a estatura das duas plantas selecionadas,  
22 medindo-se a distância entre a superfície do solo e o último nó, cujas folhas do trifólio  
23 tivessem mais de 2 cm de comprimento.

24 ii. Para fins de modelagem, os períodos de desenvolvimento da cultura são  
25 normalmente subdivididos em quatro etapas com determinação exata do início, fim e

1 duração dos estádios fenológicos de desenvolvimento da cultura, sendo representado: 1)  
2 estágio inicial (initial), representado pelo período entre a semeadura e o momento que a  
3 cultura atingiu 10% de fração de cobertura; 2) desenvolvimento rápido (crop  
4 development): crescimento vegetativo rápido até o início do crescimento reprodutivo; 3)  
5 estágio intermediário (mid-season): amplo desenvolvimento reprodutivo e 4) estágio final  
6 da cultura (late season): abrangendo os períodos de senescência, maturação, enchimento  
7 de grãos e colheita (DOORENBOS & PRUITT, 1977; DORENBOOS & KASSAM,  
8 1979; POPOVA & PEREIRA, 2011). A definição do início, fim e duração dos estádios  
9 fenológicos foi estabelecida em função das observações realizadas no campo.

10 iii. A fração de cobertura vegetal da superfície do solo foi realizada através do  
11 método da contagem dos pontos quadrados (MANNERING & MEYER, 1963). Uma  
12 grade quadriculada (0,5 x 0,5 m), composta por 100 pontos de interseção e cada ponto de  
13 interseção corresponde a 1% de fração de cobertura, sendo os pontos da malha que  
14 interceptavam o dossel vegetativo (solo coberto) e os pontos que não interceptavam o  
15 dossel (solo descoberto). Esta grade foi colocada de modo que a linha de cultivo dividisse  
16 a grade ao meio, sendo posicionada na altura do dossel da cultura até que o dossel  
17 cobrisse toda a superfície do solo, quando  $fc=1$ .

18 iv. Profundidade de raízes: Ao final do período vegetativo e início do período  
19 de florescimento, abriu-se uma trincheira para verificar a máxima profundidade de raízes  
20 e onde elas estavam mais concentradas. Resultados mostraram que mais de 90% do  
21 sistema radicular se encontrava na camada de 0-30 cm.

22 v. O monitoramento do conteúdo de água no solo ( $\theta$ ,  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) foi efetuado  
23 com sensores do tipo FDR (modelo CS616, Campbell Sci, Logan, UT, USA), instalados  
24 no centro de algumas parcelas, nas profundidades de 0-0,30 e 0,30-0,60 m, em  
25 aproximadamente três leituras semanais. A água disponível no solo (ASW) foi calculada

1 pela multiplicação do  $\theta$  pela espessura da camada, em mm, e o somatório das duas  
 2 camadas foi subtraído da lâmina de água armazenada no ponto de murcha permanente,  
 3 para cada observação.

4 vi. Para a determinação do rendimento de grãos foram colhidas as três linhas  
 5 centrais dentro de cada parcela (área útil de 3 m<sup>2</sup>). As plantas foram colhidas  
 6 manualmente, debulhando-se as vagens e o material foi pesado em balança de precisão,  
 7 determinando-se a umidade dos grãos para a realização do cálculo de rendimento por área  
 8 em kg ha<sup>-1</sup>.

9

#### 10 *Modelo SIMDualK<sub>c</sub> e a partição da evapotranspiração da cultura*

11 O modelo SIMDualK<sub>c</sub> calcula o balanço hídrico diário para um perfil de solo,  
 12 contabilizando todas as entradas e saídas, bem como a variação no armazenamento,  
 13 conforme descrito na Equação 1.

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P_i - RO_i) - I_i - CR_i + ET_{c,act,i} + DP_i \quad (1)$$

14 Em que,  $D_{r,i}$  e  $D_{r,i-1}$ , correspondem a depleção de água (mm) na zona radicular,  
 15 no dia  $i$  e dia  $i-1$ , respectivamente.  $P_i$  é a precipitação,  $RO_i$ , o escoamento superficial,  $I_i$  a  
 16 irrigação,  $CR_i$  a ascensão capilar,  $ET_{c,i}$  a evapotranspiração da cultura, e  $DP_i$  a  
 17 percolação profunda, referentes ao dia  $i$ , em mm. Neste estudo de campo, o lençol  
 18 freático tem mais de 1 m de profundidade, então  $CR$  foi assumida como nula. Os valores  
 19 de  $RO$  e  $DP$  utilizados neste trabalho foram os calibrados por MARTINS et al. (2013), no  
 20 mesmo local de campo experimental. A  $ET_{c,act}$  refere-se aos sistemas de cultivo reais, ou  
 21 seja, desde condições ótimas até a deficiência ou ausência de irrigação, em diferentes  
 22 sistemas de cultivo.

23 Proposto por ROSA et al. (2011), o modelo utiliza a metodologia do coeficiente  
 24 dual da cultura  $K_c$ , desenvolvido por ALLEN et al. (1998) e amplamente divulgado pela



1 FAO-56, particionando a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) em transpiração das plantas  
 2 e evaporação do solo. Ou seja, esse modelo nos fornece uma maior precisão na análise da  
 3 transpiração das plantas e da evaporação do solo (FANDIÑO et al. 2012; PAÇO, et al.  
 4 2012; ROSA et al. 2012b; ZHAO, et al. 2013; WEI et al., 2014, PAREDES et al., 2014;  
 5 PEREIRA et al., 2015; QIU et al., 2015.), o que permite produzir, por sua vez,  
 6 estimativas de  $ET_c$  mais precisas.

7 O modelo requer um conjunto de dados de entrada, segundo PEREIRA et al.  
 8 (2015), como segue:

9 i – Dados meteorológicos diários: evapotranspiração de referência ( $ET_o$ , mm),  
 10 precipitação (mm), temperatura máxima e mínima ( $^{\circ}C$ ), umidade relativa mínima e  
 11 máxima (%) e velocidade do vento a 2 m de altura ( $m\ s^{-1}$ ), que são apresentados na  
 12 Figura 1.

13 ii – Dados do solo: dados do solo e o número de camadas (tabela 1), as  
 14 características de evaporação do solo e espessura da camada de evaporação ( $Z_e$ ), a água  
 15 de evaporação imediata (REW) e a água evaporável total (TEW), bem como como o teor  
 16 de água do solo no momento da semeadura, expresso em % do TAW e TEW,  
 17 respectivamente (Tabela 2).

18

19 Tabela 2: Valores iniciais e calibrados do modelo SIMDual $K_c$  relativo a todos os  
 20 tratamentos, em 2018/19 e 2019/20.

Parâmetros	Inicial GIMÉNEZ et al. (2017)	Valores calibrados
Parâmetros da cultura		
$K_{cb\ ini}$	0.15	0.15
$K_{cb\ med}$	1.10	1.02
$K_{cb\ end}$	0.35	0.30
Fator de depleção (p)	0.5	0.5
Evaporação do solo		
TEW (mm)	49	27

REW (mm)	12	10
Ze (m)	0.15	0.10
	Inicial	
Percolação profunda	MARTINS et al. (2013)	Valores calibrados
aD	353	330
bD	-0,022	-0,020
Runoff (CN)	75	85

1  $K_{cb}$  = Coeficiente de cultura basal ( $K_{cb\ ini}$ ), médio ( $K_{cb\ mid}$ ) e final ( $K_{cb\ end}$ ); p: depleção;  
2 **\*\*aD e bD\*\*** são parâmetros da equação de percolação (LIU et al., 2006); Ze.: Camada  
3 de evaporação; TEW: Total de água evaporável; REW: água facilmente evaporável; CN  
4 = curva número  
5

6       iii – dados da cultura: os estádios da cultura, denominados após os estádios inicial,  
7 de desenvolvimento da cultura, meia-estação e final ou final da safra; os coeficientes de  
8 cultura basais para cada um desses estádios ( $K_{cb\ ini}$ ;  $K_{cb\ médio}$  e  $K_{cb\ final}$ ). Utilizamos os  
9 valores de  $K_{cb}$  calibrados por GIMÉNEZ et al. (2017) para soja no Uruguai para 2018/19  
10 e os validamos com dados observados da safra 2019/20. A depleção de água do solo para  
11 ausência de estresse (p) para todas as fases; profundidade de raízes ( $Z_r$ , m), altura de  
12 planta (h, m) e a fração de solo coberta pela copa ( $f_c$ ) durante a safra.

13       iv – Programação e lâminas de irrigação: a irrigação foi realizada pelo Sistema  
14 Irriga®, serviço de gerenciamento e monitoramento da irrigação que utiliza fator de  
15 depleção de água do solo de 0,40; ou seja, a irrigação foi acionada sempre que a água  
16 disponível no solo caiu quase 60% do total de água disponível (TAW). O método de  
17 irrigação utilizado foi aspersão convencional, sendo a fração de solo efetivamente  
18 umedecida ( $f_w$ ) pelo sistema de irrigação igual a 1,0.

19       v – Escoamento (RO) e percolação profunda (DP): O escoamento superficial (RO)  
20 foi estimado pelo procedimento do número da curva (CN), de acordo com a metodologia  
21 descrita por ALLEN et al. (2007), enquanto DP foi calculado usando uma função de  
22 decaimento de tempo proposta por LIU et al. (2006). Os valores iniciais de aD e bD

1 foram os calibrados por MARTINS et al. (2013) para milho no mesmo campo  
2 experimental e foram otimizados durante a calibração do modelo.

3

4 *Predição do rendimento e fator de produção em resposta a água ( $K_y$ )*

5 O modelo de água-produção Stewart, proposto por STEWART et al. (1977) e  
6 difundido por DOORENBOS & KASSAM (1979), aceito pela FAO e introduzida no  
7 modelo SIMDualK<sub>c</sub>, expõe as perdas no rendimento das culturas, quando as mesmas  
8 estão sob influência de estresse hídrico. O modelo relaciona linearmente o déficit relativo  
9 de evapotranspiração das plantas e as perdas relativas de produção para determinação do  
10 fator de produção em resposta a água ( $K_y$ ). A equação pode ser expressa da seguinte  
11 forma:

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = K_y \left( 1 - \frac{ET_{c \text{ act}}}{ET_c} \right) \quad (2)$$

12 Em que:  $Y_a$ : rendimento atual da cultura ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em condição de sequeiro;  $Y_m$ :  
13 rendimento máximo (esperado) da cultura, desprezando-se o estresse hídrico ou ambiental  
14 ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em condição irrigada;  $K_y$ : fator de produção da cultura em resposta à água;  $ET_{c \text{ act}}$ :  
15 evapotranspiração ajustada da cultura ( $\text{mm.dia}^{-1}$ ) em condição de sequeiro;  $ET_c$ :  
16 evapotranspiração máxima ou potencial (esperada) da cultura, desprezando-se o estresse  
17 hídrico ou ambiental ( $\text{mm.dia}^{-1}$ ) em condição irrigada.

18 Para a predição de rendimento da soja, aplicou-se o  $K_y$  obtido através da equação,  
19 no modelo SIMDualK<sub>c</sub>. O valor de  $K_y$  é específico de cada cultura, sendo  $K_y < 1$ : quando  
20 a cultura é mais tolerante ao déficit hídrico e se recupera parcialmente do estresse;  $K_y >$   
21 1: a resposta da cultura é muito sensível ao déficit hídrico;  $K_y = 1$ : a redução de  
22 rendimento é diretamente proporcional ao uso reduzido de água (STEDUTO et al., 2012).

23

1 *Validação do modelo e Análise estatística*

2 Para a calibração e validação do modelo para os diversos GMR's da soja, utilizou-  
 3 se em 2018/19, os coeficientes de cultura basal ( $K_{cb\ ini}$ ,  $K_{cb\ mid}$  e  $K_{cb\ end}$ ) calibrados por  
 4 GIMÉNEZ et al. (2017) e estes foram validados usando a safra 2019/20. A relação entre  
 5 os dados observados e simulados, tanto da calibração como da validação do modelo, foi  
 6 avaliada através de um conjunto de indicadores descritos por ROSA et al., (2012);  
 7 MARTINS et al. (2013) e PAREDES et al. (2014), que também utilizaram o SIMDualKc.  
 8 Os resultados da validação estão apresentados na Tabela 2. Uma regressão linear forçada  
 9 a origem foi gerada para comparar os dados observados e simulados, de forma que um  
 10 coeficiente de regressão ( $b_0$ ) próximo a 1,0 demonstra elevada relação entre os dados  
 11 observados e simulados, e um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) próximo a 1,0 indica que  
 12 a maior parte da variação dos dados observados é explicada pelo modelo, de acordo com  
 13 as equações abaixo:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i}{\sum_{i=1}^n O_i^2} \quad (3)$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left[ \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5} \left[ \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad (4)$$

14

15 Também foi utilizado o erro médio absoluto (AAE) e o erro relativo médio (ARE)  
 16 para indicar o tamanho médio dos erros estimados (MORIASI et al., 2007). Estes  
 17 indicadores foram calculados em cada interação do processo de tentativa e erro para  
 18 corroborar a conclusão de que os parâmetros ajustados levam à minimização dos erros de  
 19 estimativa.

1 A fim de avaliar a qualidade da modelagem, utilizou-se o modelo de eficiência (EF)  
 2 proposto por NASH & SUTCLIFFE (1970), que é usado para determinar a magnitude  
 3 relativa da variância residual em comparação à variância dos dados medidos (MORIASI  
 4 et al. 2007). Quando o valor de EF é próximo a zero ou negativo, significa que a média  
 5 dos valores observados é tão boa ou melhor do que aqueles simulados pelo modelo  
 6 (LEGATES e McCABE, 1999; MORIASI et al., 2007).

7

## 8 **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

9 *Partição da Evapotranspiração em transpiração da cultura (Tc) e evaporação do solo*  
 10 *(Es)*

11 Na Tabela 03 são apresentados os valores médios e desvio-padrão dos  
 12 componentes Es e Tc para cada estágio de desenvolvimento da cultura, a fim de  
 13 determinar o impacto em cada fase, bem como a razão entre Es e a  $ET_c$  no ciclo total de  
 14 desenvolvimento da soja. Em 2018/19 para um melhor ajuste da água disponível no solo  
 15 (ASW), foi adicionado um parâmetro de redução da evaporação do solo de 30% pela  
 16 utilização de um *mulching* orgânico devido a presença de resíduo de aveia preta e azevém  
 17 em grande quantidade. No segundo ano esse fator de *mulching* orgânico foi  
 18 desconsiderado pois a presença de resíduos do cultivo anterior não era muito  
 19 significativa.

20

21 Tabela 3 – Valores médios da evaporação de água do solo (Es, mm) e transpiração da  
 22 cultura (Tc, mm) para cada estágio de desenvolvimento dos diferentes GMR, para a  
 23 condição irrigada e de sequeiro.

<b>Estádios de desenvolvimento</b>									
<b>Inicial</b>		<b>Desenvolvim ento</b>		<b>Intermediário</b>		<b>Final</b>		<b>Ciclo total</b>	
<b>Es</b>	<b>Tc</b>	<b>Es</b>	<b>Tc</b>	<b>Es</b>	<b>Tc</b>	<b>Es</b>	<b>Tc</b>	<b>Es</b>	<b>Tc</b>

(mm)										
<b>2018/19</b>		<b>Sequeiro</b>								
<b>média</b>	74 (9)*	15 (2)	26 (4)	50 (8)	3,5 (1,5)	119 (22)	15 (5)	91 (25)	120 (4)	277 (7)
<b>%</b>	<b>83</b>	<b>17</b>	<b>34</b>	<b>66</b>	<b>2,8</b>	<b>97,2</b>	<b>14</b>	<b>86</b>	<b>30,2</b>	<b>69,8</b>
<b>Irrigado</b>										
<b>média</b>	78 (3)	16,5 (1,5)	25 (9)	49 (15)	5,3 (2)	148,3 (22)	15 (3)	97 (17)	124 (5)	310 (22)
<b>%</b>	<b>82,5</b>	<b>17,5</b>	<b>33,8</b>	<b>66,2</b>	<b>3,4</b>	<b>96,6</b>	<b>13,4</b>	<b>86,6</b>	<b>28,5</b>	<b>71,5</b>
<b>2019/20</b>		<b>Sequeiro</b>								
<b>média</b>	46 (3)	18 (2,5)	17,5 (3)	80 (7)	5,8 (1,8)	142 (10)	4,6 (1,8)	66,5 (20)	74,5 (1,5)	308 (1)
<b>%</b>	<b>72</b>	<b>28</b>	<b>18</b>	<b>82</b>	<b>4</b>	<b>96</b>	<b>6,5</b>	<b>93,5</b>	<b>19,5</b>	<b>80,5</b>
<b>Irrigado</b>										
<b>média</b>	53 (2)	20 (2)	22 (3)	90 (26)	3,3 (2)	162 (15)	6,8 (2)	99 (45)	84,3 (7)	371 (25)
<b>%</b>	<b>72</b>	<b>28</b>	<b>19,5</b>	<b>80,5</b>	<b>1,9</b>	<b>98,1</b>	<b>6,5</b>	<b>93,5</b>	<b>18,5</b>	<b>81,5</b>

1 \*Os valores entre parêntesis representam o desvio padrão (mm) entre os diferentes GMR's

2 A Es é um dos componentes do balanço hídrico mais significativo e em um  
3 sistema produtivo, as perdas por Es são significativas. Nos dois anos os maiores valores  
4 da Es foram observados nos estádios iniciais da cultura, para todos tratamentos, em média  
5 83% da ETc em 2018/19 e 71% em 2019/20, devido às frequentes irrigações e ausência  
6 de cobertura do solo pelo dossel das plantas. Conforme o crescimento e desenvolvimento  
7 das plantas, ocorre o fechamento das entrelinhas, a evaporação da água do solo diminui  
8 em consequência do maior sombreamento, contudo com o aumento da área foliar da  
9 planta, sua transpiração aumenta e com isso há maior demanda hídrica.

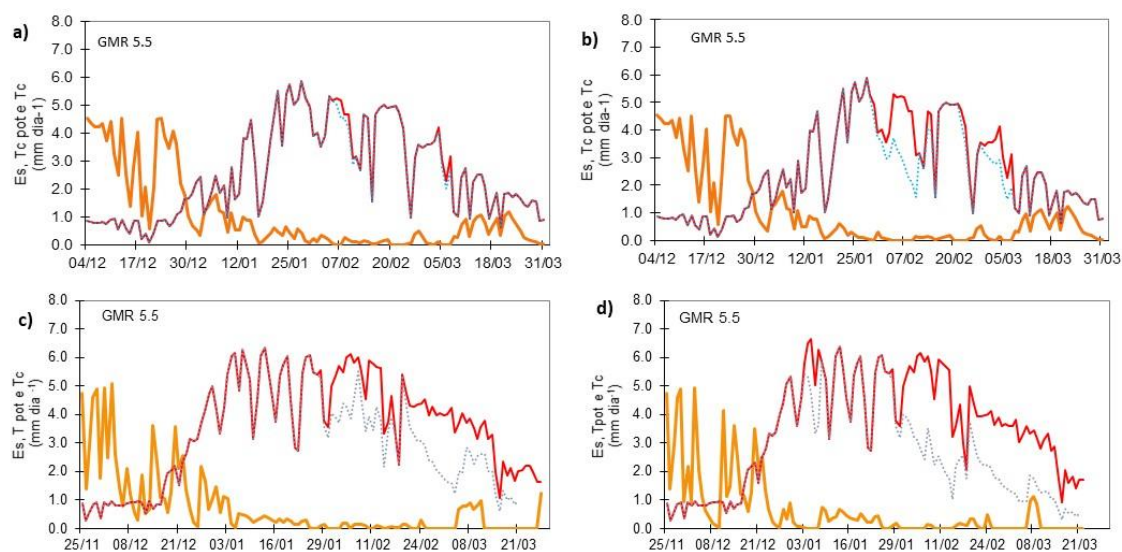
10 Assim, os valores máximos da Tc são observados no período intermediário do  
11 ciclo de desenvolvimento, em média de 97% da ETc, momento em que as plantas  
12 apresentaram valores máximos de altura, IAF e *fc* o que demonstra a maior necessidade  
13 de água pelas plantas pelo estágio em que se encontram, de florescimento e enchimento  
14 de grãos. Dados semelhantes foram observados por SINGER et al. (2010), os quais  
15 mencionam que durante o estágio reprodutivo, a Tc representou entre 89% a 96% da ETc,  
16 demonstrando que o IAF influencia diretamente nesse componente.

1           Essa informação é relevante para os programas de manejo de irrigação, como  
2 uma estratégia que busque melhorar a eficiência do uso da água, quando em algumas  
3 situações é possível reduzir a quantidade de água aplicada, nos períodos iniciais do  
4 desenvolvimento da cultura quando a  $T_c$  é baixa, sem reduzir a produtividade. Nesse  
5 sentido, MONTOYA et al. (2017) obtiveram maior produtividade e lucro ao aplicar uma  
6 irrigação correspondente a 75% da necessidade hídrica da soja, nos estágios R1 a R8.  
7 Para isso deve-se priorizar o ajuste do manejo, individualizando os efeitos da transpiração  
8 e da evaporação direta da água do solo, fornecendo a quantidade certa de água nos  
9 períodos de maior exigência, diminuindo custos com água e energia, mas buscando  
10 manter a taxa de  $T_c$  elevada, mantendo a taxa fotossintética e produção de  
11 fotoassimilados nos períodos intermediários.

12           A razão  $E_s/ET_c$  foi em média 29% e 19% para 2018/19 e 2019/20,  
13 respectivamente, indicando maior contribuição da evaporação no processo de  
14 evapotranspiração no primeiro ano em relação ao segundo, devido a ocorrência de maior  
15 volume de precipitação nesse estágio no primeiro experimento. Neste contexto, os  
16 tratamentos com maior disponibilidade de água no solo apresentaram valores superiores  
17 de  $T_c$  (310 e 371 mm) quando comparados com os tratamentos sob sequeiro (277 mm e  
18 308 mm).

19           Na Figura 2, analisando-se as linhas de  $T_c$ , observa-se que as mesmas estão  
20 diretamente relacionadas com a fase de desenvolvimento da cultura da soja, apresentando  
21 condições inversas ao componente de  $E_s$ , pela baixa influência da evaporação da água do  
22 solo no processo evapotranspirativo. Conforme mencionado por PAREDES et al. (2016),  
23 a  $E_s$  não cumpre uma função específica na produtividade da cultura e afeta a eficiência de  
24 uso de água no cultivo. Autores como SINGH et al. (2014), WEI et al. (2015);  
25 ODHIAMBO et al. (2015) e ÁVILA (2016), também descrevem situações semelhantes

1 referente a dinâmica observada nos componentes do balanço hídrico  $E_s$  e  $T_c$ , na cultura  
 2 da soja. A importância da disponibilidade destes dados está baseada na análise do  
 3 consumo da água e seus efeitos na produtividade da cultura e da água, já que a  $E_s$  que é  
 4 considerada uma perda de água não benéfica para o sistema, ou seja, essa água não  
 5 contribui efetivamente para a produção (RODRIGUES & PRUSKI, 2019).



6

7 Figura 2 - Variação diária da evaporação do solo ( $E_s$ , mm, —), transpiração da cultura  
 8 ( $T_c$ , mm, ...) e transpiração potencial ( $T_{pot}$ , mm, —) para a soja GMR 5,5: sendo a) e b)  
 9 2018/19 irrigado e sequeiro respectivamente e c) e d) 2019/20 irrigado e sequeiro  
 10 respectivamente.

11

12 Ainda, conforme pode-se observar (Figura 2 a) que representa o tratamento  
 13 irrigado, as linhas da transpiração e da transpiração potencial praticamente se sobrepõem,  
 14 pela boa disponibilidade de água no solo, uma condição ideal indicando que a planta está  
 15 em condições ótimas para conseguir atingir o potencial máximo de produção. Esse  
 16 resultado pode ser considerado satisfatório, pois demonstra também um melhor  
 17 aproveitamento da água pelas plantas, aumentando a produtividade da água. Do contrário  
 18 (figura 2 b, c e d), quando há um desencontro das linhas da transpiração potencial e da



1 transpiração da cultura podemos dizer que é função da ocorrência de estresse hídrico, o  
 2 qual é computado pelo modelo em forma de  $K_s$ , reduzindo a transpiração da cultura em  
 3 função da reduzida disponibilidade hídrica no solo (ROSA et al., 2012a; b).

4

5 *Produtividade de grãos observada e estimativa do fator  $K_y$  da cultura da soja*

6 Para priorizar o aumento da produtividade da água, é fundamental entender, para  
 7 os mais diversos GMR de soja, em que magnitude o déficit de água no solo influencia as  
 8 características da planta e sua produtividade. Nos dois anos de experimento todos GMR  
 9 de soja apresentaram reduções de produtividade (Tabela 4) na condição de sequeiro em  
 10 relação ao irrigado. Em 2018/19 as plantas de soja apresentaram redução média de 8% na  
 11 produtividade de grãos e a diferença entre a produtividade observada e estimada pelo  
 12 modelo foi de 67,61 Kg ha<sup>-1</sup> em média. AYDINSAKIR (2018) também observou queda  
 13 de 8% na produtividade da cultura da soja quando aplicou 75% da necessidade hídrica da  
 14 cultura.

15

16 Tabela 4 - Produtividade de grãos de soja observada, estimada e variação (kg.ha<sup>-1</sup>), sob  
 17 condição irrigada e de sequeiro para cada GMR.

	GMR	Irrigado	Sequeiro	Estimada sob sequeiro	Varição	Fator $K_y$
		Produtividade (kg ha <sup>-1</sup> )				média
<b>2018/19</b>	5	3266.08	2928.87	2985.00	+56.13	<b>GMR 5</b>
	5.5	3265.79	2979.53	3008.00	+28.47	
	5.8	3659.73	3482.82	3527.00	+44.18	<b>GMR 5.5</b>
	6.8	3275.84	3002.33	3144.00	+141.67	
	<b>Média</b>	<b>3366.86</b>	<b>3098.39</b>	<b>3166.00</b>	<b>+67.61</b>	1,01
<b>2019/20</b>	5	4400.87	3679.42	3680.00	+0.58	<b>GMR 5.8 - 5.9</b>
	5.5	3842.81	3194.69	3196.00	+1.31	0,51
	5.9	3540.54	3188.72	3194.00	+5.28	<b>GMR 6.5 - 5.8</b>
	6.5	4555.64	3852.70	3854.00	+1.30	
	<b>Média</b>	<b>4084.97</b>	<b>3478.88</b>	<b>3481.00</b>	<b>+2.12</b>	-

18

1           Em 2019/20 a produtividade de grãos sob sequeiro foi 14,80% inferior aos  
2 tratamentos irrigados. Já a diferença entre a produtividade observada e estimada no  
3 segundo ano foi mínima, de apenas 2,12 Kg ha<sup>-1</sup> em média. NUNES et al. (2016)  
4 observaram redução de 36% no rendimento da cultura de soja ao aplicarem metade da  
5 necessidade de irrigação e GAJI et al. (2018) obtiveram maior produtividade da cultura  
6 da soja aplicando 65% da irrigação total requerida. Assim, a boa disponibilidade de água  
7 para a cultura no período de florescimento e enchimento de grãos é essencial para a  
8 obtenção de uma boa produtividade de grãos, especialmente entre as cultivares de menor  
9 e maior GMR. No caso da cultura da soja, existem ainda outros fatores que exercem  
10 grande influência na fenologia e conseqüentemente na produtividade, como a temperatura  
11 e o número de horas de luz, já para o manejo da cultura, a data de semeadura e as  
12 cultivares utilizadas são as mais importantes (ANDA et al., 2020; LIU; DAI, 2020;  
13 MESQUITA et al., 2020).

14           Para SILVA et al. (2020) o uso da irrigação, mesmo no período das chuvas, tende  
15 a reduzir o risco da variabilidade de produtividade entre as safras, como os que foram  
16 observado por MONTOYA et al. (2017) que, produzindo soja em regime de sequeiro,  
17 observaram que o rendimento de grãos e a biomassa final apresentaram redução de até  
18 35%, quando comparados a sistemas irrigados. SENTELHAS et al. (2015), trabalhando  
19 com soja no Sul do Brasil, observaram lacunas de rendimento de 500 a 1.600 kg ha<sup>-1</sup>  
20 ocasionadas por déficit hídrico, o que está de acordo com esse estudo também.

21           O fator de produção  $K_y$  que relaciona linearmente o déficit relativo de  
22 evapotranspiração das plantas e as perdas relativas de produção estão apresentado na  
23 Tabela 4. Os maiores valores de  $K_y$  total foi em média 1,13 para a soja de GMR 5 e  $K_y$   
24 1,01 para GMR 5,5, o que demonstra que especial atenção deve ser dada às cultivares de  
25 menor GMR. O valor de  $K_y$  total variou de 0,51 a 0,59 para as cultivares de GMR

1 intermediário e longo, entre 5,8 e 6,8, o que demonstra uma grande variação na  
 2 sensibilidade da cultura à deficiência hídrica entre os diferentes grupos de maturidade  
 3 relativa. GIMÉNEZ et al. (2017), em estudo com a soja no Uruguai, optou pela utilização  
 4 de um  $K_y$  de 1,25. Outros pesquisadores utilizaram diferentes valores de  $K_y$  para a cultura  
 5 da soja: DOORENBOS & KASSAM (1979) propuseram um  $K_y$  de 0,85, ZHANG et al.  
 6 (2015), indicando que a soja era muito sensível ao estresse hídrico adotaram o  $K_y$  de 1,24.  
 7 Em contrapartida WEI et al. (2014) tiveram resultados superestimados de previsão do  
 8 rendimento usando um  $K_y$  igual a 1,3 (2015).

9 Na Tabela 5 são apresentados os coeficientes médios de regressão ( $b_0$ ),  
 10 determinação ( $R^2$ ) e eficiência de modelagem para a relação entre a produtividade de  
 11 grãos de soja observada e estimada pelo modelo de regressão linear, para os dois anos  
 12 agrícolas. O  $b_0$  ficou entre 1,0 e 1,02 para os dois anos de experimento, o que indica que a  
 13 produtividade estimada correspondeu bem às observações no campo, apresentando uma  
 14 boa associação. O coeficiente de determinação,  $R^2$ , variou em média de 0,96 a 1,00 o que  
 15 indica, portanto, que a maior parte das variações pode ser explicada pelo modelo. A  
 16 eficiência de modelagem (EF) foi de 1,00 para os dois anos, considerada elevada, o que  
 17 indica que a magnitude relativa da variância residual é comparável à da variância dos  
 18 dados observados.

19

20 Tabela 5 – Coeficientes médios de regressão ( $b_0$ ) e determinação ( $R^2$ ) relativos à  
 21 produtividade obtida a campo e simulada pelo SIMDualkc, utilizando o fator de produção  
 22 em resposta a água ( $K_y$ ).

	<b>Coeficiente de Regressão</b>	<b>Coeficiente de Determinação</b>	<b>Eficiência de modelagem</b>
	<b><math>b_0</math></b>	<b><math>R^2</math></b>	<b>EF</b>
<b>2018/19</b>	1.02	0.96	1.00
<b>2019/20</b>	1.00	1.00	1.00

1 \*b<sub>0</sub>: Coeficiente linear de regressão; R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinação; EF: Eficiência de  
2 Modelagem

3

#### 4 **CONCLUSÃO**

5 O modelo SIMDualK<sub>c</sub> foi eficiente na simulação da transpiração e evaporação da  
6 água solo durante o ciclo de desenvolvimento dos diferentes GMRs da soja. As maiores  
7 perdas de água por Es foram observadas nos estádios iniciais da cultura, para todos  
8 tratamentos, em média 77% da ET<sub>c</sub>, devido às frequentes irrigações e ausência de  
9 cobertura do solo pelo dossel das plantas, o que demonstra uma possibilidade de reduzir a  
10 quantidade de água via irrigação, nesses períodos iniciais de desenvolvimento, podendo  
11 gerar uma economia do uso de água sem prejuízos a produtividade de grãos.

12 Já os valores máximos da T<sub>c</sub> são observados no período intermediário do ciclo de  
13 desenvolvimento, em média de 97% da ET<sub>c</sub>, o que demonstra a maior necessidade de  
14 água pelas plantas pelo estágio em que se encontram, de florescimento e enchimento de  
15 grãos. Para isso deve-se priorizar o ajuste do manejo, individualizando os efeitos da  
16 transpiração e da evaporação direta da água do solo, fornecendo a quantidade certa de  
17 água nos períodos de maior exigência, buscando atingir os maiores valores de  
18 produtividade de grãos e de uso da água.

19 Os maiores valores de K<sub>y</sub> foram obtidos para as cultivares de soja de GMR 5 e 5,5 o  
20 que demonstra que especial atenção deve ser dada às cultivares de menor GMR, sendo  
21 que os valores inferiores a 1 foram obtidos para as cultivares GMR maiores que 5,8, o  
22 que demonstra uma grande variação na sensibilidade da cultura à deficiência hídrica entre  
23 as diferentes cultivares de soja.

24

#### 25 **AGRADECIMENTOS**

26 À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em

1 Engenharia Agrícola representados pelos professores e funcionários que nestas se  
2 dedicam ao ensino e trabalham para a formação de profissionais.

3  
4 **DECLARAÇÃO DE CONFLITO DE INTERESSES**

5 Os autores declaram não haver conflito de interesses.

6  
7 **CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES**

8 Todos os autores contribuíram igualmente para a concepção do trabalho.

9

**REFERENCIAS**

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., & SMITH, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy: FAO, 300 pp.

10 ALLEN, R. G. et al. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration  
11 with Internalized Calibration (METRIC)-Model. **Journal of Irrigation and Drainage**  
12 **Engineering**, v.133, n.4, p.380-394, 2007a. doi: 10.1061/(ASCE)0733-  
13 9437(2007)133:4(380)

14 ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S. (2009). Estimating crop coefficients from fraction of  
15 ground cover and height. **Irrigation Science**, 28(1), 17-34.

16 ANDA, A. et al. Yield features of two soybean varieties under different water supplies  
17 and field conditions. **Field Crops Research**, v. 245, p. 107673, 2020.

18 AYDINSAKIR, K. Yield and Quality Characteristics of Drip-Irrigated Soybean under  
19 Different Irrigation Levels. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 4, p. 1473–1481, 2018.

20 DOORENBOS, J., KASSAM, A.H., 1979. Yield response to water. In: FAO Irrigation  
21 and Drainage Paper 33. FAO, Rome, 193 pp.

22 FANDIÑO, M. et al. (2012). Using the dual-Kc approach to model evapotranspiration of  
23 albarin~ o vineyards (Vitis vinifera L. cv. albarin~ o with consideration of active ground  
24 cover. **Agricultural Water Management**, 112, 75e87.

25 GIMÉNEZ, L. et al. Water Use and Yield of Soybean under Various Irrigation Regimes  
26 and Severe Water Stress. Application of AquaCrop and SIMDualKc Models. **Water**  
27 2017, 9, 393.

- 1 KOTTEK, M. et al. World Map of Köppen-Geiger climate classification updated.  
2 **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259-263, 2006.
- 3 LIU, Y.; DAI, L. Modelling the impacts of climate change and crop management  
4 measures on soybean phenology in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 262, p.  
5 121271, 2020.
- 6 LIU, Y. et al. Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils:  
7 Parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation.  
8 **Agricultural Water Management**, v.84, p.27-40, 2006. doi:  
9 10.1016/j.agwat.2006.01.018
- 10 MANNERING, J. V. MEYER, L. D. The effect of various rates of surface mulch an  
11 infiltration and erosion. *Soil Science of American Procceding*, v. 27, n.1, p. 84-86, 1963
- 12 MARTINS, J. D. et al. (2013). Dual crop coefficients for maize in southern Brazil: Model  
13 testing for sprinkler and drip irrigation and mulched soil. **Biosystems Engineering**, 115,  
14 291-310. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.03.016>
- 15 MESQUITA, R.O. et al. Physiological approach to decipher the drought tolerance of a  
16 soybean genotype from Brazilian Savana. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 151,  
17 p. 132-143, 2020.
- 18 MONTOYA, F.; GARCÍA, C.; PINTOS, F.; OTERO, A. Effects of irrigation regime on  
19 the growth and yield of irrigated soybean in temperate humid climatic conditions.  
20 *Agricultural Water Management*, v. 193, p. 30-45, 2017.
- 21 NUNES, A.C. et al. Aspectos agronômicos de plantas de soja submetidas a déficit  
22 hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 7, p. 654-  
23 659, 2016.
- 24 PAÇO, T. A. et al. (2012). The dual crop coefficient approach using a density factor to  
25 simulate the evapotranspiration of a peach orchard: SIMDualKc model vs. eddy  
26 covariance measurements. **Irrigation Science**, 30(2), 115e126.
- 27 PAREDES, P. et al. 2014. Partitioning evapotranspiration, yield prediction and economic  
28 returns of maize under various irrigation management strategies. **Agricultural Water  
29 Management** 135, 27-39.
- 30 PEREIRA, L. S. et al. Modeling malt barley water use and evapotranspiration  
31 partitioning in two contrasting rainfall years. Assessing AquaCrop and SIMDualKc  
32 models. **Agricultural Water Management** 159 (2015) 239-254.
- 33 POPOVA, Z., PEREIRA, L. S. (2011). Modeling for maize irrigation scheduling using  
34 long term experimental data from Plovdiv region, Bulgaria. **Agricultural Water  
35 Management**, 98, 675e683.
- 36 QIU, R., et al. Assessing the SIMDualKc model for estimating evapotranspiration of hot  
37 pepper grown in a solar greenhouse in Northwest China. **Agricultural Systems**, Volume  
38 138, September 2015, Pages 1-9

- 1 RODRIGUES, L. N.; PRUSKI, F. F. Fundamentos e benefícios do sistema de integração  
2 lavoura-pecuária-floresta para os recursos hídricos. Embrapa Cerrados, Capítulo em livro  
3 técnico (INFOTECA-E), 2019.
- 4 STEDUTO, P.; HSIAO, T.C., RAES, D. & FERERES, E. AquaCrop-The FAO crop  
5 model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles.  
6 **Agronomy Journal**, v. 101, p. 426-437, 2009. doi: 10.2134/agronj2008.0139s.
- 7 STRECK, E. V., KAMPF, N., DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.  
8 C; SCHNEIDER, P. (2008). SOLOS DO RIO GRANDE DO SUL (2 ed.). Porto Alegre:  
9 Emater/RS, 222 pg.
- 10 WEI Z. et al. (2015) Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of  
11 soybean in North China Plain. **Agricultural Water Management** 147:43-53. DOI:  
12 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.004>
- 13 ZHAO, N. N. et al. (2013). Dual crop coefficient modelling applied to the winter wheat  
14 summer maize crop sequence in North China Plain: basal crop coefficients and soil  
15 evaporation component. **Agricultural Water Management**, 117, 93 e105.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo SIMDualKc foi capaz de simular a variação da água disponível no solo (ASW), separando a transpiração da cultura ( $T_c$ ) da evaporação do solo ( $E_s$ ), e não apresentou qualquer tendência para sub ou superestimação durante os diferentes estádios de crescimento das plantas, até a colheita. A rentabilidade da produção agrícola e a sustentabilidade dos recursos hídricos dependem do correto manejo da água na agricultura, o qual é determinado pela precisão nas estimativas das necessidades hídricas dos cultivos (MAJIDI et al., 2015). Indicadores relativos a erros, neste estudo, mostraram que estes são pequenos, menores do que 6,2% da TAW, pela boa correlação verificada entre os dados observados a campo e aqueles simulados pelo modelo. O modelo determinou também os coeficientes culturais para os diferentes GMR's de soja: os valores de  $K_{cb_{ini}}$ ,  $K_{cb_{mid}}$  e  $K_{cb_{end}}$  de 0,15; 1,02 e 0,30, precisam ainda ser melhor ajustados, observando-se o início e a duração dos estádios principais do cultivo, principalmente a progressão da senescência foliar e altura do dossel nestes períodos.

Neste estudo a  $ET_c$  acumulada foi em média para todas as cultivares 435 e 451 mm para os tratamentos irrigados e 399 e 378 mm para os tratamentos em sequeiro para o primeiro e segundo ano de cultivo, respectivamente. Houve, portanto, uma redução na  $ET_c$  total de 8% e 16% quando as plantas foram cultivadas sob sequeiro, no primeiro e segundo ano respectivamente.

Em todos os tratamentos os valores do  $K_e$  foram mais elevados durante a fase inicial do ciclo e foram reduzindo conforme as plantas foram crescendo e se desenvolvendo aumentando a  $f_c$  e o IAF. O  $K_e$  é, portanto, inversamente linkado à  $f_c$  e diretamente influenciado pela fração de solo molhada pela chuva e/ou irrigações ( $f_w$ ) e exposta aos eventos atmosféricos, como a radiação solar (PEREIRA et al., 2015a), originando-se da razão entre a  $E_s$  e a  $ET_o$ . Quanto menor a incidência de radiação solar disponível no solo menor a energia disponível para evaporação da água. Ao final do ciclo, já no período de senescência os valores de  $K_e$  elevaram-se novamente, pela ocorrência de precipitações e água disponível no solo. A  $E_s$  é um dos componentes do balanço hídrico mais significativo e em um sistema produtivo, as perdas por  $E_s$  são significativas. Nos dois anos os maiores valores da  $E_s$  foram observados nos estádios iniciais da cultura, para todos tratamentos, em média 83% da  $ET_c$  em 2018/19 e 71% em 2019/20. Essa informação é relevante para os programas de manejo de irrigação, como



uma estratégia que busque melhorar a eficiência do uso da água, quando em algumas situações é possível reduzir a quantidade de água aplicada, nos períodos iniciais do desenvolvimento da cultura quando a  $T_c$  é baixa, sem reduzir a produtividade.

Nos tratamentos com maior disponibilidade de água, as linhas da transpiração e da transpiração potencial praticamente se sobrepõem, uma condição ideal indicando que a planta está em condições ótimas para conseguir atingir o potencial máximo de produção, o que demonstra também um melhor aproveitamento da água pelas plantas de soja, aumentando a produtividade da água. Para priorizar o aumento da produtividade da água, é fundamental entender, para os mais diversos GMR de soja, em que magnitude o déficit de água no solo influencia as características da planta e sua produtividade, isso deve ser feito com um controle melhor de cada estágio de desenvolvimento, em diferentes épocas de semeadura e em diferentes locais também.

Ao longo dos últimos anos, muitos estudos objetivaram derivar os coeficientes de cultura a partir de características biofísicas da vegetação como a fração de cobertura pelo dossel ( $f_c$ ), o índice de área foliar (LAI) e altura de plantas (MORAES, 2022). ALLEN & PEREIRA (2009) por exemplo, quando relacionaram o  $K_{cb}$  com uma função da  $f_c$  usando um coeficiente de densidade ( $K_d$ ). Os Intervalos em valores, para os dois anos de cultivo, sequeiro e irrigado, dos parâmetros utilizados, incluindo  $K_d$ , para as simulações pela abordagem A&P estão apresentados na tabela 1. Os valores de  $K_d$  obtidos nesse estudo, são iguais para todos os tratamentos nos períodos inicial e intermediários e, menores nos tratamentos sob sequeiro nos estádios de desenvolvimento rápido e final. Nesse estudo os valores de  $F_r$  adotados para os períodos: inicial e desenvolvimento rápido, foram iguais a 1.00 para todos os tratamentos, já para os períodos intermediário e final do ciclo, os valores adotados para os tratamentos sob sequeiro foram inferiores ( $F_r < 1$ ) aos adotados para os tratamentos irrigados ( $0.8 < F_r < 1.00$ ). Já que  $F_r$  é um fator de ajuste relativo ao controle estomático da vegetação, assumimos que as plantas em condições de restrição hídrica apresentam um menor controle estomático.

A figura 1 representa a curva do  $K_{cb}$  usando a aproximação A&P ( $K_{cb}$  A&P) associados a soma térmica acumulada (GDD), como sugere LOPEZ-URREA et al., (2014), permitindo estabelecer a ocorrência das diferentes fases, sobretudo a  $f_c$  e a maturação fisiológica (PEREIRA et al., 2015b; PETRY et al., 2021). Observou-se uma boa correlação ajustada por um modelo polinomial cúbico entre o GDD e o  $K_{cb}$  A&P ( $R^2=0,92$ ).

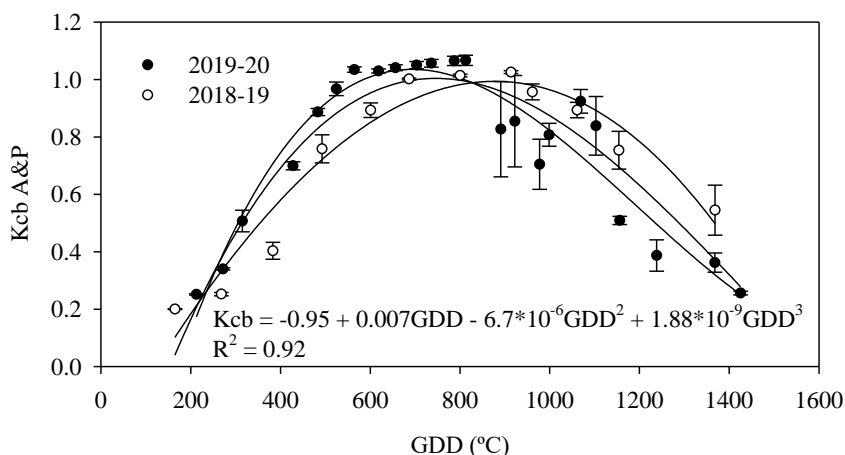


Figura 1: Relação entre o coeficiente de cultura basal obtido pela abordagem de Allen & Pereira (2009) e os graus-dia de crescimento para quatro grupos de maturidade da soja, em duas safras no Sul do Brasil, utilizando um polinômio múltiplo de terceira ordem. As barras verticais são o desvio padrão entre as médias.

Na figura 2 é apresentada a relação entre os graus-dia acumulados (GDD) e a fração de cobertura ( $f_c$ ) do solo até o sombreamento completo da superfície, isto é, quando toda a  $ET_c$  é devido a  $T_c$ . Para a relação GDD e  $f_c$  a correlação foi linear apresentou bons resultados ( $R^2=0,98$ ), pois a fração de cobertura ( $f_c$ ) tende a apresentar relação linear ou quadrática com o  $K_{cb}$ , para o período vegetativo e resposta não-linear para a fase intermediária, quando o dossel tende a sombrear completamente a superfície (PEREIRA et al., 2020a, b). MEDEIROS et al. (2001) ajustaram uma polinomial cúbica entre o GDD e o IAF para o feijão, entretanto, os mesmos autores (MEDEIROS et al., 2016) ajustaram uma resposta quadrática entre o GDD-IAF para feijão cultivado em lisímetros. Pode-se observar que, para todos os GMRs, o dossel fecha completamente a entrelinha ( $f_c=1,0$ ) com um acumulado de 600 a 700 GDD, assumindo uma temperatura base de 12.5°C. LOPES-URREA et al (2014) também encontraram resposta linear entre os GDD e a  $f_c$  para o girassol, entretanto, não encontraram sombreamento total da superfície.

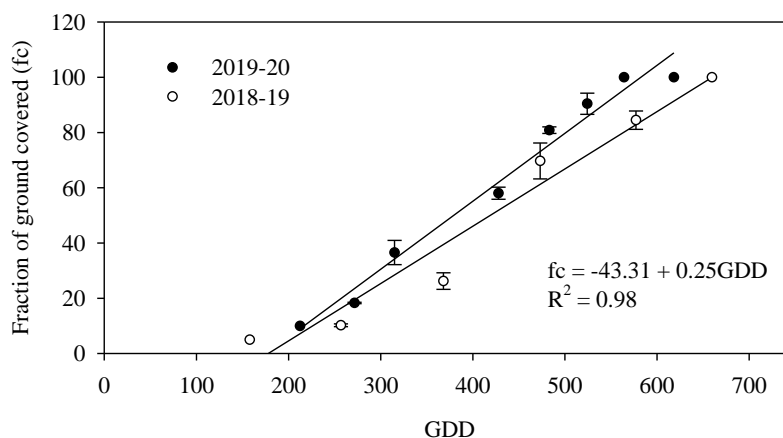


Figura 2: Relação entre a fração cobertura do solo (até fechamento do dossel,  $fc=1$ ) e os graus-dia de crescimento desde a semeadura até o início do estágio intermediário para diversos grupos de maturidade da soja no sul do Brasil.

Os tratamentos sob sequeiro, apresentaram redução média de 8% no rendimento de grãos em 2018/19 e 14,8% em 2019/20. Assim, o correto manejo da disponibilidade hídrica do solo é muito importante para enfrentar períodos de alta probabilidade de ocorrência de déficit hídrico na cultura, como os observados neste estudo.

Tabela 01 – Intervalo em valores, para os dois anos de cultivo, sequeiro e irrigado, dos parâmetros utilizados para as simulações pela abordagem A&P. Santa Maria – RS, 2022.

	<b>Estádio</b>	<b>Fc</b>	<b>h (m)</b>	<b>Kd</b>	<b>Fr</b>	<b>K<sub>cb</sub> A&amp;P</b>	<b>K<sub>cb</sub> full A&amp;P</b>
<b>Irrigado</b>	Initial	0.05-0.10	0.07	0.06-0.12	1.00	0.2-0.25	1.00-1.02
	Crop development	0.35-0.64	0.16-0.21	0.40-0.67	1.00	0.48-0.76	0.98-1.05
	Mid-season	0.96-1.00	0.55-0.69	0.97-1.00	0.89-1.00	1.00-1.04	1.00-1.06
	Late season	0.70-0.83	0.74	0.87	0.80-0.89	0.51-0.84	0.91-1.03
<b>Sequeiro</b>	Initial	0.05-0.10	0.06-0.08	0.06-0.12	1.00	0.2-0.25	1.00-1.04
	Crop development	0.35-0.55	0.16-0.18	0.38-0.58	1.00	0.47-0.67	0.98-1.04
	Mid-season	0.96-1.00	0.57-0.61	0.97-1.00	0.8 - 0.95	0.89-0.98	0.89-1.01
	Late season	0.67-0.81	0.68-0.74	0.77-0.84	0.39-0.71	0.39-0.75	0.83-1.00