

DIEGO BISPO DOS SANTOS FARIAS

**COEFICIENTES TÉCNICOS PARA SIMULAÇÃO E MANEJO DE
IRRIGAÇÃO EM SOJA SOB DÉFICIT HÍDRICO**

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

Orientador: Lineu Neiva Rodrigues

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2020**

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

T

F224c
2020 Farias, Diego Bispo dos Santos, 1993-
Coeficientes técnicos para simulação e manejo de irrigação
em soja sob déficit hídrico / Diego Bispo dos Santos Farias. –
Viçosa, MG, 2020.
112 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Lineu Neiva Rodrigues.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Soja - Irrigação. 2. Cultivos agrícolas - Modelos matemáticos. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22 ed. 633.34

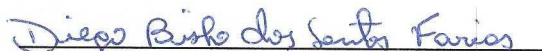
DIEGO BISPO DOS SANTOS FARIAS

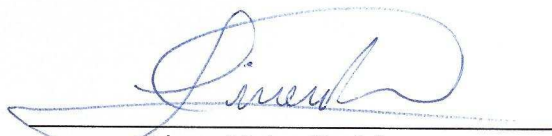
**COEFICIENTES TÉCNICOS PARA SIMULAÇÃO E MANEJO DE
IRRIGAÇÃO EM SOJA SOB DÉFICIT HÍDRICO**

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

APROVADA: 16 de julho de 2020.

Assentimento:


Diego Bispo dos Santos Farias


Lineu Neiva Rodrigues

A Deus,

AGRADEÇO.

Aos meus familiares,

amigos e amigas,

DEDICO.

À Comunidade Técnico-Científica,

OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo incentivo, confiança e amor.

À minha segunda família conquistada em Brasília, a qual integra Juciane Teixeira, a quem agradeço pelo amor, carinho e atenção.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Lineu Neiva Rodrigues, pela orientação, confiança, amizade e apoio.

À professora Catariny Cabral Aleman, por aceitar fazer parte da minha banca.

Ao pesquisador Claudio García Gallarreta, por aceitar fazer parte da minha banca.

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

À EMBRAPA Cerrados pela concessão da infraestrutura para o desenvolvimento dos experimentos.

Aos meus amigos que me ajudaram na execução dos experimentos, Élvis Alves, Silas Souza e Douglas Lorena.

Aos meus amigos de vida e os conquistados na pós-graduação através do CRRH e GESAI, pela amizade e companheirismo.

Enfim, a todos que me ajudaram de alguma forma na execução desse projeto, o meu muito obrigado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

BIOGRAFIA

DIEGO BISPO DOS SANTOS FARIAS nasceu no dia 31 de maio de 1993 em Salvador, BA, filho de Vânia Bispo dos Santos e José Augusto Vieira Farias, irmão de Joel Júnior e Rebeca Santos.

Em julho de 2018, concluiu o curso de Engenharia Agrônômica na Universidade Federal de Sergipe.

Em agosto de 2018, iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola na área de Recursos Hídricos, submetendo-se à defesa em julho de 2020.

“O homem sábio é forte, e o homem de conhecimento consolida a força”
(Provérbios, 24:5)

RESUMO

FARIAS, Diego Bispo dos Santos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2020. **Coefficientes técnicos para simulação e manejo de irrigação em soja sob déficit hídrico.** Orientador: Lineu Neiva Rodrigues.

O aumento da área de soja irrigada tem demandado mais conhecimento sobre o seu manejo. Avaliar como o déficit hídrico impacta a produção da soja é fundamental para o manejo da cultura e da irrigação e para a gestão de recursos hídricos na região. O objetivo geral desta dissertação foi desenvolver coeficientes técnicos para o manejo de irrigação. Para isso, foram conduzidos quatro experimentos de campo (maio a agosto (95 DAS) e setembro a dezembro (107 DAS) de 2019). O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados com cinco tratamentos e quatro repetições. No tratamento controle (SE), a irrigação foi realizada de forma a atender 100% da demanda hídrica da cultura em todos os seus estádios de desenvolvimento. Nos demais tratamentos, a irrigação foi suspensa em estádios específicos de desenvolvimento da cultura (TI = VC-V4, TII = V5-R1, TIII = R1-R5 e TIV = R5-R7), sendo retomada após esses períodos. Em paralelo foi desenvolvido outros dois experimentos no mesmo delineamento experimental que o anterior, onde os tratamentos foram: TI, o manejo da irrigação foi conduzido de forma a manter um déficit de água no solo variando de 0 a 20%; no tratamento TII, a variação permitida do déficit hídrico foi de 20 a 40%; no tratamento TIII foi de 40 a 60%; em TIV foi de 60 a 80%; e de 80% a 100%, em TV. De acordo com os resultados, as variáveis altura de plantas, área foliar, biomassa, sistema radicular, peso de 1000 grãos e produtividade, foram afetadas significativamente pela ocorrência de déficits hídricos. Após calibrado, o modelo AquaCrop simulou a cobertura vegetal, a biomassa e o rendimento da soja de forma satisfatória. Os valores médios do coeficiente de cultura nos estádios inicial e final foram maiores que os apresentados no boletim FAO 56. O fator de resposta ao rendimento da soja sob déficit hídrico em todo o ciclo foi menor que o indicado no boletim FAO 33. Os fatores de resposta ao rendimento determinado em diferentes estádios foram maiores nos estádios R1-R5 e R5-R7 em todos os modelos estudados.

Palavras-chave: Déficit hídrico. Estádios de desenvolvimento. Modelagem agrícola. Evapotranspiração atual.

ABSTRACT

FARIAS, Diego Bispo dos Santos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2020. **Technical coefficients for simulation and irrigation management in soybean under water deficit.** Adviser: Lineu Neiva Rodrigues.

In recent years, irrigated agriculture in the Cerrado region has expanded rapidly. The increase in the area of irrigated soybean has demanded more knowledge about its management. Assessing how the water deficit impacts soybean production is essential for the management of culture and irrigation and for the management of water resources in the region. The overall objective of this thesis was to develop technical coefficients for irrigation management. For this, two field experiments were conducted (May to August (95 DAS) and September to December (107 DAS) 2019). The experimental design used was in randomized blocks with five treatments and four replications. In the control treatment (SE), irrigation was carried out in order to meet the water demand of the crop in all its stages of development. In the other treatments, irrigation was suspended at specific crop development stages (TI = VC-V4, TII = V5-R1, TIII = R1-R5 and TIV = R5-R7) and then resumed. In parallel, two other experiments were developed in the same period with five treatments and four replications. In the TI treatment, irrigation management was conducted in order to maintain a deficit of water in the soil ranging from 0 to 20%; in the TII treatment, the permitted variation of the water deficit was 20 to 40%; in TIII treatment it was 40 to 60%; in TIV it was 60 to 80%; and 80% to 100%, on TV. The results showed that the variables plant height, leaf area, biomass, root system, weight of 1000 grains and productivity, were significantly affected by the occurrence of water deficits. After calibrated, the AquaCrop model simulated the canopy cover, biomass and soybean yield satisfactorily. The average values of the crop coefficient in the initial and final stages were higher than those presented in the FAO 56 bulletin. The yield response factor to soybean under water deficit throughout the cycle was less than that indicated in the FAO 33 bulletin. Yield response factor determined at different stages were higher at stages R1-R5 and R5-R7 in all models studied.

Keywords: Water deficit. Development stages. Agricultural modeling. Real evapotranspiration.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1.1. Temperaturas máxima (Tmax) e mínima (Tmin) do ar, radiação solar, precipitação e evapotranspiração de referência (ET0) ocorridas nos experimentos 1 (a) e 2 (b) durante o cultivo de soja. | 25 |
| Figura 2.1.2. Valores médios de altura de planta de soja observados nos diferentes tratamentos (SE, TI, TII, TIII e TIV) dos experimentos 1 (a) e 2 (b). | 26 |
| Figura 2.1.3. Valores médios de área foliar (a e c) e biomassa (b e d) de soja observados nos diferentes tratamentos (SE, TI, TII, TIII e TIV) dos experimentos 1 e 2. | 28 |
| Figura 2.1.4. Valores médios de peso seco da raiz (a e b) e de relação raiz/parte aérea (c e d) de soja observados nos diferentes tratamentos (SE, TI, TII, TIII e TIV) dos experimentos 1 e 2. | 31 |
| Figura 2.1.5. Valores médios de peso de 1000 grãos (P1000) de soja observados nos tratamentos (SE, TI, TII, TIII e TIV) dos experimentos 1 (a) e 2 (b). | 32 |
| Figura 2.1.6. Valores médios de produtividade da soja observados nos diferentes tratamentos (SE, TI, TII, TIII e TIV) dos experimentos 1 (a) e 2 (b). | 34 |
| Figura 2.1.7. Comportamento do déficit hídrico no solo observado nos diferentes tratamentos (SE, TI, TII, TIII e TIV) do experimento 1, ao longo do ciclo da cultura da soja. | 36 |
| Figura 2.1.8. Comportamento do déficit hídrico no solo observado nos diferentes tratamentos (SE, TI, TII, TIII e TIV) do experimento 2, ao longo do ciclo da cultura da soja. | 37 |
| Figura 2.1.9. Relação entre a produtividade e peso de 1000 grãos com o déficit hídrico no solo para o experimento 1 (a e c) e 2 (b e d). | 38 |
| Figura 2.2.1. Temperaturas máxima (Tmax) e mínima (Tmin) do ar, radiação solar, precipitação e evapotranspiração de referência (ET0) ocorridas nos experimentos 1 (a) e 2 (b) durante o cultivo de soja. | 54 |
| Figura 2.2.2. Cobertura vegetal da soja observada e simulada e indicadores de desempenho do modelo calibrado para cada tratamento do experimento 1 e 2 (validação), em função dos dias após a semeadura (DAS) | 55 |
| Figura 2.2.3. Valores, observados e simulados, de conteúdo de água diário no perfil de solo de 0-0,4m e indicadores de desempenho do modelo calibrado para cada tratamento do experimento 1 e 2 (validação), em função dos dias após a semeadura (DAS) | 56 |
| Figura 2.2.4. Valores, observados e simulados, de evapotranspiração atual diária e indicadores de desempenho do modelo calibrado para cada tratamento do experimento 1 e 2 (validação), em função dos dias após a semeadura (DAS).. | 57 |

| | |
|--|-----|
| Figura 2.2.5. Biomassa seca acima do solo da soja observada e simulada e indicadores de desempenho do modelo calibrado para cada tratamento do experimento 1 e 2 (validação), em função dos dias após a semeadura (DAS). | 59 |
| Figura 2.2.6. Correlação entre os dados observados e simulados de rendimento do modelo calibrado para cada tratamento do experimento 1 (a) e 2 (b). | 60 |
| Figura 2.3.1. Temperaturas máxima (Tmax) e mínima (Tmin) do ar, radiação solar, precipitação e evapotranspiração de referência (ET0) ocorridas nos experimentos 1 (a) e 2 (b) durante o cultivo de soja. | 74 |
| Figura 2.3.2. Evapotranspiração atual total semanal da cultura da soja irrigada sob níveis de déficit hídrico e seus respectivos estádios de desenvolvimento durante os experimentos 1 (a) e 2 (b). | 75 |
| Figura 2.3.3. Valores médios e diários dos coeficientes de cultura calculados e propostos pelo método FAO 56 durante os estádios inicial, médio e final, para todos os tratamentos durante os experimentos 1 e 2. | 76 |
| Figura 2.3.4. Fator de resposta ao rendimento da soja sob déficit hídrico. | 78 |
| Figura 2.3.5. Rendimento atual (Ya) observado e simulado pelo modelo de Doorenbos e Kassam (1979) dos experimentos 1 (a) e 2 (b). | 78 |
| Figura 2.3.6. Produtividade de uso de água da soja cultivada com diferentes níveis de déficit hídrico nos experimentos 1 (a) e 2 (b) | 79 |
| Figura 2.4.1. Temperaturas máxima (Tmax) e mínima (Tmin) do ar, radiação solar, precipitação e evapotranspiração de referência (ET0) ocorridas nos experimentos 1 (a) e 2 (b) durante o cultivo de soja. | 94 |
| Figura 2.4.2. Evapotranspiração atual acumulada da soja, cultivada com déficit hídrico aplicado nos estádios de desenvolvimento em função dos dias após a semeadura nos experimentos 1 (a) e 2 (b) | 95 |
| Figura 2.4.3. Produtividade de uso da água da soja cultivada com déficit hídrico aplicado em diferentes estádios de desenvolvimento nos experimentos 1 (a) e 2 (b). | 98 |
| Figura 2.4.4. Relação entre o rendimento, evapotranspiração atual (ETa) e irrigação total para o experimento 1 (a e b) e 2 (c e d). | 99 |
| Figura 2.4.5. Rendimento atual (Ya) observado e simulado pelo modelo de Stewart 1977, Jensen et al., 1968 e Minhas et al., 1974. | 100 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 2.2.1. Parâmetros de soja calibrados através do experimento 1 e padrão do modelo AquaCrop usado neste estudo | 53 |
| Tabela 2.2.2. Valores de rendimento observados e simulados para cada tratamento dos experimentos 1 e 2. | 60 |
| Tabela 2.3.1. Rendimento médio de grãos de soja cultivada nos diferentes tratamentos com e sem déficit hídrico no experimento 1 e 2 | 77 |
| Tabela 2.4.1. Rendimento médio de grãos de soja nos diferentes tratamentos, com e sem déficit hídrico, nos experimentos 1 e 2..... | 97 |
| Tabela 2.4.2. Valores de fatores de resposta de rendimento de Stewart. 1977, Jensen et al., 1968 e Minhas et al., 1974, para a soja sob déficit hídrico em diferentes estádios de desenvolvimento..... | 100 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----|
| 1 | Introdução Geral | 13 |
| 1.1 | Referências Bibliográficas | 15 |
| 2 | Artigos científicos | 19 |
| 2.1 | Características de crescimento e de rendimento da cultura da soja submetida a diferentes estratégias de déficit hídrico | 19 |
| 2.1.1 | Introdução..... | 19 |
| 2.1.2 | Material e métodos | 21 |
| 2.1.3 | Resultados e discussão | 25 |
| 2.1.4 | Conclusões | 39 |
| 2.1.5 | Referências bibliográficas | 40 |
| 2.2 | Avaliação do modelo AquaCrop para simulação da produtividade e biomassa de soja sob déficit hídrico aplicado em estágios específicos de crescimento no Cerrado brasileiro | 45 |
| 2.2.1 | Introdução..... | 46 |
| 2.2.2 | Material e métodos | 48 |
| 2.2.3 | Resultados | 54 |
| 2.2.4 | Discussão..... | 61 |
| 2.2.5 | Conclusões | 63 |
| 2.2.6 | Referências bibliográficas | 63 |
| 2.3 | Fator de resposta ao rendimento, coeficiente de cultura e produtividade de uso da água da soja submetida a diferentes níveis de déficit hídrico | 68 |
| 2.3.1 | Introdução..... | 68 |
| 2.3.2 | Material e métodos | 70 |
| 2.3.3 | Resultados | 74 |
| 2.3.4 | Discussão..... | 80 |
| 2.3.5 | Conclusões | 82 |
| 2.3.6 | Referências bibliográficas | 83 |
| 2.4 | Avaliação do fator de resposta ao rendimento e da produtividade da água da soja sob déficit hídrico aplicado em estágios específicos de crescimento.. | 87 |
| 2.4.1 | Introdução..... | 87 |
| 2.4.2 | Material e métodos | 90 |
| 2.4.3 | Resultados | 94 |
| 2.4.4 | Discussão..... | 101 |
| 2.4.5 | Conclusões | 104 |
| 2.4.6 | Referências bibliográficas | 105 |
| 3 | Conclusões Gerais | 111 |

1 Introdução Geral

O Brasil se destaca como produtor e exportador de várias commodities agrícolas. É um dos maiores produtores mundiais de alimento, respondendo por 7,3% das exportações agrícolas mundiais (ALLEN; VALDES, 2016; MEADE et al., 2016; FAPDA, 2014). O país, com exportações da ordem de 79,5 milhões de toneladas na safra agrícola de 2018/2019, é o maior exportador de soja do mundo (USDA, 2019). Nesta mesma safra, a produção foi de 115,34 milhões de toneladas, o que gerou uma receita bruta de R\$ 126,61 bilhões de reais. A soja é a principal *commodity* agrícola brasileira.

Na safra de 2016/17, mais da metade (50,4%) da área cultivada com soja no Brasil (33,9 Mha) estava concentrada no bioma Cerrado (AGROSATÉLITE, 2018). Nessa região a soja é uma cultura tipicamente cultivada em condições de sequeiro (DA SILVA et al., 2019), porém ela tem sido cada vez mais cultivada em sistemas irrigados, o que tem contribuído para aumentar a demanda de água na região, que já enfrenta problemas hídricos em algumas de suas principais bacias hidrográficas.

Cerca de 64% da área irrigada no Brasil está localizada na região do Cerrado (BRASIL, 2014), que concentra aproximadamente 80% de todos os pivôs centrais do Brasil (ALTHOFF; RODRIGUES, 2019). Considerando o atual cenário de uso da água e o aumento das disputas pelo uso de recursos hídricos, é necessário que haja um planejamento adequado da irrigação, principal usuária de recursos hídricos, que considere o crescimento da irrigação no Cerrado, principalmente para a produção de soja. O interessante é que nesse planejamento sejam considerados os possíveis impactos de diferentes estratégias de manejo de irrigação no desenvolvimento sustentável da agricultura da região.

Entre as outorgas emitidas para pivôs centrais, 14,7% foram solicitadas para irrigação da soja (ANA, 2016). Vale ressaltar, entretanto, que na estação chuvosa (outubro a abril) a irrigação da cultura da soja representa mais de 60% de toda a irrigação na região. O crescimento do cultivo de soja irrigada indica a necessidade do aperfeiçoamento de critérios para o manejo de irrigação desta cultura. Neste contexto, várias estratégias de irrigação podem ser utilizadas, como, por exemplo, a irrigação com déficit que, se conduzida adequadamente, pode contribuir efetivamente para reduzir a demanda de irrigação com pouco impacto na qualidade e quantidade da produção, favorecendo o aumento na produtividade de uso de água e da rentabilidade

(RAGAB, 1996, FERERES; SORIANO, 2007, GEERTS; RAES, 2009, RUIZ-SÁNCHEZ et al., 2010).

Para realizar a irrigação de forma total, suplementar ou com déficit, as necessidades hídricas das culturas devem ser conhecidas, visando a obtenção de boas produtividades. Neste sentido, o conhecimento do coeficiente de cultura (K_c) é fundamental, já que ele geralmente é parâmetro de entrada indispensável nos modelos de manejo que se fundamentam no balanço de água no solo. Embora exista na literatura uma vasta quantidade de informação sobre o K_c para a cultura da soja (WEI et al., 2015; KARAM et al., 2005; ODHIAMBO et al., 2012), pouco se tem feito para as condições da região do Cerrado brasileiro, e menos ainda se tem feito para avaliar a resposta do rendimento ao déficit hídrico das novas variedades de soja que são lançadas anualmente no mercado brasileiro.

Modelos de simulação podem ser utilizados não apenas para simular estratégias de irrigação, mas também para auxiliar na tomada de decisão. Esses modelos, entretanto, para ter mais exatidão nas simulações precisam ser calibrados, validados e ter parâmetros de entradas mais representativos da região e da cultura de interesse, principalmente para as novas cultivares. Os modelos de manejo de irrigação podem ser mais complexos, demandando maior quantidade de dados de entrada (JONES et al., 2003; PEREIRA et al., 2003; SMITH, 1992; SANTOS et al., 2000), ou mais simples, geralmente requerendo informações básicas de solo, planta e clima.

Na estratégia de desenvolvimento de modelos mais simples e menos demandantes de dados de entrada, o AquaCrop (STEDUTO et al., 2009; RAES et al., 2009) tem sido bastante utilizado. Esse modelo foi desenvolvido, a princípio, para estimar a produtividade, a necessidade de água e a produtividade de uso da água de uma cultura em condições limitantes de água (RAES et al., 2009). Ele fundamenta-se nos conceitos apresentados por Doorenbos e Kassam. (1979) que relaciona a resposta do rendimento das culturas à quantidade de água aplicada. Além do rendimento da cultura, o modelo também simula o conteúdo de água no solo (MKHABELA; BULLOCK, 2012; ABDALHI et al., 2019; BABEL et al., 2019). Os dados de entrada do modelo podem ser obtidos de forma simples (VANUYTRECHT et al., 2014; STEDUTO et al., 2009; RAES et al., 2009) o que facilita a sua aplicação, principalmente em regiões com carência de dados, como é o caso do Cerrado brasileiro.

Aplicar uma estratégia de irrigação com base no déficit hídrico, requer o conhecimento da resposta da cultura ao estresse hídrico nos seus diferentes estádios de crescimento. A redução de rendimento devido ao estresse hídrico pode ser expressa por uma curva, traçada entre a redução relativa do rendimento e a redução relativa da evapotranspiração. A inclinação dessa curva representa o fator de resposta de rendimento da cultura ao estresse hídrico. Isto é, ela representa, a forma como o rendimento da cultura responde ao estresse hídrico (KIPKORIR et al., 2002; GREAVES; WANG, 2016; IGBADUN et al., 2007; STEWART et al., 1977; DOORENBOS; KASSAM, 1979; JENSEN, 1968; MINHAS et al., 1974). Este fator de resposta de rendimento da cultura ao estresse hídrico pode ser estimado por meio de modelos matemáticos do tipo multiplicativo (JENSEN, 1968; MINHAS et al., 1974) ou aditivo (STEWART et al. 1977). O fator de resposta de rendimento de uma cultura pode ser determinado para todo o ciclo, mantendo-se um déficit hídrico estável durante todo o ciclo da cultura (DOORENBOS; KASSAM, 1979).

Dessa forma, se faz necessário o desenvolvimento de estudos e aprimoramento de técnicas de manejo de irrigação para otimizar o uso da água e contribuir com o incremento de produtividade da cultura da soja no Cerrado.

1.1 Referências Bibliográficas

ABDALHI, M. A. M.; JIA, Z.; LUO, W.; TANG, S.; ALI, O. O.; CHENG, J. FAO AquaCrop Model Performance: in Green Canopy Cover, Soil Moisture and Production of Maize at Middle and Lower Reaches Plain of Yangtze River of China. **Russian Agricultural Sciences**, v. 45, n. 2, p. 186-193, 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil - 2014: relatório síntese**. Brasília: ANA, 2016. 37 p.

AGROSATÉLITE. **Análise geoespacial da dinâmica da soja no bioma Cerrado: 2014 a 2017**. Florianópolis: Gtc, 2018. 24 p.

ALLEN, E.; VALDES, C. **Brazil's Corn Industry and the Effect on the Seasonal Pattern of U.S. Corn Exports**. AES-93, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, June 2016.

ALTHOFF D.; RODRIGUES LN. The expansion of center-pivot irrigation in the Cerrado biome. **IRRIGA**, v. 1, n. 1, p. 56-61, 2019.

BABEL, M. S.; DEB, P.; SONI, P. Performance evaluation of AquaCrop and DSSAT-CERES for maize under different irrigation and manure application rates in the Himalayan Region of India. **Agricultural research**, v. 8, n. 2, p. 207-217, 2019.

BRASIL. **Análise territorial para o desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil**. Brasília: MI, 2014, 217 p.

DA SILVA E.H.; GONÇALVES, A.O.; PEREIRA, R.A.; JÚNIOR I.M.F.; SOBENKO, L.R.; MARIN, F.R. Soybean irrigation requirements and canopy-atmosphere coupling in Southern Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 218, p. 1-7, 2019.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. **Yield Response to Water**. Irrigation and Drainage Paper 33. Rome: FAO, 1998. 257 p.

FAPDA (FOOD AND AGRICULTURE POLICY DECISION ANALYSIS). 2014 **Brazil country fact sheet on food and agriculture policy trends**. [s.l.], FAPDA, 2014. 5 p.

FERERES, E.; SORIANO, M. A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal of Experimental Botany**, [s.l.], v. 58, n. 2, p. 147-159, 6 nov. 2006.

GEERTS, A.; RAES, D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 96, n. 9, p. 1275-1284, set. 2009.

GREAVES, G. E.; WANG, Y. Yield response, water productivity, and seasonal water production functions for maize under deficit irrigation water management in southern Taiwan. **Plant Production Science**, [s.l.], v. 20, n. 4, p. 353-365, 22 ago. 2017.

IGBADUN, H. E.; TARIMO, A. K. P.R.; SALIM, B. A.; MAHOO, H. F. Evaluation of selected crop water production functions for an irrigated maize crop. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 94, n. 1-3, p. 1-10, dez. 2007.

JENSEN, M.E. Water consumption by agricultural plants. *In*: Kozłowski TT. **Water deficits and plant growth, vol 2**. New York: Academic Press, 1968.p. 1–22.

JONES, J.W; HOOGENBOOM, G; PORTER, C.H; BOOTE, K.J; BATCHELOR, W.D; HUNT, L.A; WILKENS, P.W; SINGH, U; GIJSMAN, A.J; RITCHIE, J.T. **European Journal of Agronomy**, [s.l.], v. 18, n. 3-4, p. 235-265, jan. 2003.

KARAM, F.; MASAAD, R.; SFEIR, T.; MOUNZER, O.; ROUPHAEL, Y. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 75, n. 3, p. 226-244, jul. 2005.

KIPKORIR, E.C.; RAES, D.; MASSAWE, B. Seasonal Water Production Functions and Yield Response Factors for Maize and Onion in Perkerra, Kenya. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 56, n. 3, p. 229-240, ago. 2002.

MEADE, B.; PURICELLI, E.; MCBRIDE, W.; VALDES, C.; HOFFMAN, L.; FOREMAN, L.; DOHLMAN, E. **Corn and soybean production costs and export competitiveness in Argentina, Brazil, and the United States**. EIB-154, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, June 2016.

MINHAS, B. S.; PARIKH, K. S.; SRINIVASAN, T. N. Toward the structure of a production function for wheat yields with dated inputs of irrigation water. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 10, n. 3, p. 383-393, jun. 1974.

MKHABELA, M. S.; BULLOCK, P. R. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. **Agricultural Water Management**, v. 110, p. 16-24, 2012.

ODHIAMBO, L. O.; IRMAK, S. Evaluation of the impact of surface residue cover on single and dual crop coefficient for estimating soybean actual evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, v. 104, p. 221-234, 2012.

PEREIRA L. S.; TEODORO, P. R.; RODRIGUES, P. N.; TEIXEIRA, J. L. Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG. In **Tools for drought mitigation in Mediterranean regions**. Springer: Dordrecht. 2003. p. 161-180.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 438-447, 2009.

RAGAB, R. Constraints and applicability of irrigation scheduling under limited water resources, variable rainfall and saline conditions. In: Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO) (ed.), **Irrigation Scheduling: from Theory to Practice**. Rome (Italy), 1996. pp. 149–165.

RUIZ SÁNCHEZ, M.C.; DOMINGO, R.; CASTEL, J.R (2010). Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain. **Spanish journal of agricultural research**, n. 2, p. 5-20, 2010.

SANTOS, A. M.; CABELGUENNE, M.; SANTOS, F. L.; OLIVEIRA, M. R.; SERRALHEIRO, R. P.; BICA, M. A. EPIC-PHASE: a model to explore irrigation strategies. **Journal of agricultural engineering research**, v. 75, n. 4, p. 409-416, 2000.

SMITH, M. **CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management**. Rome: FAO, 1992. 126 p.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 426-437, 2009.

STEWART, J.I.; HAGAN, R.M.; PRUITT, W.O.; HANKS, R.J.; RILEY, J.P.; DANIELSON, R.E.; FRANKLIN, W.T.; JACKSON, E.B. **Optimising crop production through control and water salinity levels**. Utah water research lab. PRWG151-1, Utah State University, Utah Logan. 1977.

USDA. **10º levantamento USDA da safra 2018/19 - Fevereiro/19**.

VANUYTRECHT, E.; RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; HENG, L. K.; VILA, M.G.; MORENO, P. M. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. **Environmental Modelling & Software**, v. 62, p. 351-360, 2014.

WEI, Z.; PAREDES, P.; LIU, Y.; CHI, W. W.; PEREIRA, L. S. Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of soybean in North China Plain. **Agricultural water management**, v. 147, p. 43-53, 2015.

2 Artigos científicos

2.1 Características de crescimento e de rendimento da cultura da soja submetida a diferentes estratégias de déficit hídrico

Resumo

A região do Cerrado tem se destacado no cenário da agricultura brasileira, principalmente no cultivo da soja. Avaliar o impacto do déficit hídrico nos diferentes estádios de crescimento da soja é fundamental para o manejo da cultura e da irrigação e para a gestão de recursos hídricos. Objetivou-se neste trabalho: (i) avaliar o impacto do déficit hídrico em estádios específicos de desenvolvimento nas características de crescimento e rendimento de uma nova cultivar de soja (BRS 7581RR); (ii) correlacionar o peso de 1000 grãos e a produtividade da cultura de soja submetida a déficits hídricos em diferentes estádios de crescimento. Para isso, foram conduzidos dois experimentos de campo (maio a agosto e setembro a dezembro de 2019). O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados com cinco tratamentos e quatro repetições. No tratamento controle (SE), a irrigação foi realizada de forma a atender a demanda hídrica da cultura em todos os seus estádios de desenvolvimento. Nos demais tratamentos, a irrigação foi suspensa em estádios de desenvolvimento da cultura específicos (TI = VC-V4, TII = V5-R1, TIII = R1-R5 e TIV = R5-R7) e depois retomada. As variáveis altura de plantas, área foliar, biomassa, sistema radicular, peso de 1000 grãos e produtividade da soja foram avaliados em cada tratamento. As variáveis analisadas, foram afetadas significativamente pela ocorrência de déficits hídricos, principalmente durante os estádios VC-V4, R1-R5 e R5-R7. A relação raiz/parte aérea foi maior nos estádios VC-V4, R1-R5 e R5-R7, com valores iguais a 0,097, 0,094 e 0,1, respectivamente. Houve correlação linear entre o déficit hídrico no solo com a produtividade e com o peso de 1000 grãos.

Palavras-chave: Componente de produção. Biomassa. Estresse hídrico. Estádios de desenvolvimento.

2.1.1 Introdução

A produção agrícola tem aumentado de forma progressiva nas últimas décadas, no entanto, ainda não é suficiente para suprir o aumento da demanda por alimentos, cerca de 49% (GOUEL; GUIMBARD, 2019), necessários para atender a uma

população mundial que em 2050 será de aproximadamente 10 bilhões de habitantes (FAO, 2017; RAMANKUTTY et al., 2018; UNITED NATIONS, 2017).

O Brasil desempenha um papel importante na produção mundial de alimentos, se destacando como produtor e exportador de várias *commodities* agrícolas. É responsável por aproximadamente 7,3% das exportações agrícolas globais (ALLEN; VALDES, 2016; MEADE et al., 2016; FAPDA, 2014) e, com um montante exportado de cerca de 79,5 milhões de toneladas na safra 2018/2019, segundo relatório do USDA (2019), é o maior exportador de soja do mundo.

A cultura da soja (*Glycine max* L.), por servir de base para a alimentação humana e animal, tem se destacado como uma cultura fundamental no desenvolvimento de estratégias de segurança alimentar. Com uma produção de 115,34 milhões de toneladas, e receita bruta de R\$ 126,61 bilhões de reais obtida na safra 2018/19 (CONAB, 2019), a soja é a principal *commodity* agrícola brasileira. A partir da soja são obtidas uma grande variedade de produtos com elevadas quantidades de proteínas, o que pode levar, nos próximos anos, ao aumento da demanda de produtos derivados da soja (FAO, 2015; VAN DER SPIEGEL et al., 2013; SHEWRY et al., 2003).

O Cerrado é o segundo maior bioma do país em extensão. Ocupando uma área aproximada de 204 milhões de hectares, é considerado a principal fronteira agrícola do Brasil. Essa região responde atualmente por 44,6% de toda a produção de cereais, leguminosas e oleaginosas produzidas no país (IBGE, 2018).

Na safra de 2016/17, mais da metade (50,4%) da área cultivada com soja no Brasil (33,9 Mha) estava concentrada no bioma Cerrado (AGROSATÉLITE, 2018). Embora seja uma cultura tipicamente de sequeiro, a soja tem sido cada vez mais cultivada em sistemas irrigados, o que tem contribuído para aumentar a demanda de água na região, que já enfrenta problemas hídricos em algumas de suas bacias hidrográficas.

Entre as outorgas emitidas para pivôs centrais, 14,7% foram solicitadas para irrigação da soja (ANA, 2016). Vale ressaltar, entretanto, que na estação chuvosa (outubro a abril) a irrigação da cultura da soja representa mais de 60% de toda a irrigação na região. O crescimento do cultivo de soja irrigada indica a necessidade do aperfeiçoamento de critérios para o manejo de irrigação desta cultura.

Para melhorar o desempenho de irrigação na região, é fundamental desenvolver estratégias de manejo que possam reduzir o uso de recursos hídricos sem comprometer

a produção agrícola. Neste contexto, várias estratégias de irrigação podem ser utilizadas, como, por exemplo, a irrigação com déficit que, se conduzida adequadamente, pode contribuir efetivamente para reduzir a demanda de irrigação com pouco impacto na qualidade e quantidade da produção, favorecendo o aumento na produtividade de uso de água e da rentabilidade (RAGAB, 1996, FERERES; SORIANO, 2006, GEERTS; RAES, 2009, RUIZ-SÁNCHEZ et al., 2010).

De forma geral, a soja apresenta pouca sensibilidade ao déficit hídrico no estágio inicial de crescimento vegetativo e alta sensibilidade no estágio produtivo (MONTROYA et al., 2017). As respostas das características de crescimento e de produtividade dessa cultura submetida a diferentes níveis de déficit hídrico no solo, entretanto, podem não ser as mesmas, uma vez que dependem do material genético da planta, condições climáticas locais, entre outros fatores.

Em regiões que já enfrentam escassez hídrica em algum período do ano, como é o caso de algumas bacias hidrográficas da região do Cerrado que fazem uso intensivo da irrigação, é importante avaliar diferentes estratégias de manejo de irrigação e seu impacto na produtividade e nas características de crescimento da cultura da soja. Poucos estudos foram conduzidos na região no sentido de entender como que a época de ocorrência de déficit hídricos (veranicos) impacta a produtividade, principalmente das novas cultivares de soja, em função do estágio de desenvolvimento que a cultura se encontra.

O presente trabalho objetivou: (i) avaliar o impacto do déficit hídrico em estádios específicos de crescimento nas características de crescimento e rendimento de uma nova cultivar de soja (BRS 7581RR); (ii) identificar a correlação entre o déficit hídrico no solo com o peso de 1000 grãos e com a produtividade da cultura de soja BRS 7581RR, submetida a déficits hídricos em diferentes estádios de crescimento.

2.1.2 Material e métodos

2.1.2.1 Área experimental

Os experimentos foram conduzidos de maio a agosto e de outubro a dezembro de 2019 com a cultura de soja cultivar BRS 7581RR (tipo indeterminado). Os experimentos foram instalados na Unidade de Referência em Manejo de Água (URMA), do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Embrapa Cerrados), localizada na região do Planalto Central do Bioma Cerrado (15°35'55,1"S, 47°42'27,4"W).

O clima da região é classificado como Aw (KÖPPEN, 1948), com temperatura média do ar igual a 22°C e precipitação pluvial de 1,500 mm ano⁻¹, sendo concentrada entre os meses de outubro a março (MALAQUIAS et al., 2010). O solo da área é classificado como Latossolo vermelho, contendo 58% de argila, e possui valores médios de densidade global, ponto de murcha permanente e capacidade de campo nas camadas 0-20 cm e 20-40 cm iguais a $D_s = 1,09 \text{ g cm}^{-3}$, $PMP = 0,23 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ e $CC = 0,35 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$, respectivamente.

Os dados meteorológicos necessários para execução do trabalho foram obtidos de uma estação climatológica localizada a aproximadamente 2 km do experimento. A evapotranspiração de referência (ET₀) foi calculada de acordo com a equação FAO-Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998).

A irrigação foi realizada por meio de um sistema de irrigação por gotejamento enterrado. O sistema consistia de mangueira gotejadora lateral, enterrada a 28 cm, e emissores espaçados de 0,9 m entre linhas e 0,4 m entre emissores, com pressão inicial dos emissores de 20 mca e vazão de 2 L h⁻¹.

2.1.2.2 Manejo da cultura

A cultura foi semeada com espaçamento de 0,5 m entre linhas e 18 plantas por metro linear, visando atingir a densidade de 360.000 plantas por hectare. A adubação foi feita no sulco de semeadura nas seguintes quantidades: 22,5 kg de N; 112,5 kg de P₂O₅ e 112,5 kg de K₂O por hectare, com base na análise química do solo e seguindo recomendações de Sousa e Lobato (2004). A semeadura do experimento 1 ocorreu em 06/05/2019 e a colheita em 09/08/2019. O segundo experimento (experimento 2), foi semeado em 09/09/2019 e colhido em 25/12/2019.

2.1.2.3 Delineamento experimental

Os experimentos foram montados no delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições (4 m x 2 m) em cada um dos cinco tratamentos (9 m x 20 m), totalizando vinte parcelas experimentais.

No tratamento controle (SE), a irrigação foi completa em todos os estádios de desenvolvimento, ou seja, a irrigação foi manejada de forma a suprir toda a demanda hídrica da cultura, visando sempre elevar o solo a capacidade de campo, em todas os seus estádios de desenvolvimento. Nos demais tratamentos, a irrigação foi totalmente suspensa em determinadas fases fenológicas da cultura. A irrigação era suspensa apenas durante o período de duração da fase. Finalizada a fase fenológica, a irrigação era retomada conforme o tratamento controle. Para fins de avaliação do impacto do

déficit hídrico, as seguintes fases fenológicas foram consideradas: VC-V4 (TI); V5-R1 (TII); R1-R5 (TIII); e R5-R7 (TIV). Por exemplo, no tratamento TI, a irrigação foi completamente suspensa do início da fase fenológica VC ao início da fase V5, quando foi retomada. Para facilitar o entendimento, daqui por diante, tratamento com déficit hídrico significa tratamento em que a irrigação foi suspensa.

As fases fenológicas da cultura foram identificadas por meio de avaliação morfológica da planta no campo e pela medição da porcentagem de cobertura vegetal. Para a avaliação da cobertura vegetal, foram obtidas imagens fotográficas do início e final de cada estágio correspondente aos tratamentos, obtendo-se assim, 10 imagens no experimento 1 e 10 imagens no experimento 2, por meio de um smartphone posicionado a 60 cm de altura do dossel, de uma área delimitada por uma moldura de 1m² em cada parcela experimental. A imagem obtida foi ajustada a moldura e processada por meio do aplicativo mobile Canopeo (PATRIGNANI; OCHSNER 2015).

2.1.2.4 Manejo da irrigação e medição da umidade do solo

A lâmina de irrigação aplicada foi calculada com base no valor da umidade atual do solo em cada tratamento, conforme Equação 1.

$$LA = \frac{0,1 (\theta_{CC} - \theta_{atual})}{Ef} Ds Z \quad (1)$$

em que

- LA = lâmina de irrigação aplicada, mm;
- θ_{CC} = umidade do solo na capacidade de campo, %;
- θ_{atual} = umidade atual do solo em cada tratamento, %;
- Ds = densidade global do solo, g cm⁻³;
- Z = profundidade do sistema radicular da cultura, cm;
- Ef = Eficiência de irrigação (Ef = 0,90).

A irrigação era aplicada quando a umidade, medida na zona radicular, atingia 50% da água total disponível no solo (CTA). A umidade do solo foi determinada por meio do método gravimétrico. Amostras de solo foram retiradas diariamente nas camadas de 0-20 e 20-40 cm em cada parcela experimental, pesadas e posteriormente levadas para serem secas em estufa à 105 °C por 24h. Após a secagem, as amostras eram novamente pesadas. Após obtenção do peso úmido e seco do solo, obtinha-se a umidade atual do solo e procedia-se os cálculos da lâmina de irrigação a ser aplicada em cada tratamento.

2.1.2.5 Medição das características de crescimento e rendimento da planta

As seguintes características da planta foram obtidas: altura média da planta, comprimento da raiz, peso seco de raiz, relação raiz/parte aérea, área foliar, biomassa seca acima do solo, produtividade e peso de 1000 grãos. A altura de planta foi obtida ao final do ciclo da cultura em todos os tratamentos, com o auxílio de uma régua milimetrada. A área foliar foi avaliada por meio de um medidor de área foliar LI-3100c (Licor, Inc., Lincoln, NE, EUA) aos 70 DAS (experimento 1) e 80 DAS (experimento 2), momento este, que correspondeu a máxima cobertura observada. Para isto, eram retiradas quatro plantas, em cada uma das quatro repetições, dos cinco tratamentos. A biomassa da cultura foi avaliada, retirando-se as plantas presentes em 0,5 m linear, na linha de plantio, nas quatro repetições. Após serem retiradas, a raiz, caule, folha e vagens foram separadas e acondicionadas em sacos de papel e levadas para a estufa, onde ficaram secando por 36h a uma temperatura de 75°C e posteriormente pesadas. De posse desses dados procedeu-se o cálculo da relação raiz/parte aérea. No experimento 1, as avaliações de biomassa, comprimento de raiz, massa seca de raiz e biomassa seca acima do solo foram realizadas aos 90 dias após a semeadura (DAS). No experimento 2, estas avaliações foram realizadas aos 100 DAS.

Para avaliação do rendimento de grãos e o peso de 1000 grãos, foi selecionada aleatoriamente uma área em cada uma das quatro repetições e coletadas todas as plantas existentes em 2 metros lineares. As vagens de cada planta foram debulhadas e os grãos foram contados para a obtenção do peso de 1000 grãos, todos os grãos foram acondicionados em sacos de papel devidamente identificados e encaminhados para o laboratório de análises de sementes da EMBRAPA Cerrados, onde foram pesados em balança analítica, e após a correção da umidade do grão para 13%, o rendimento foi determinado em cada tratamento. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, e as médias foram comparadas utilizando-se o teste de Tukey, adotando-se o nível de 5% de probabilidade.

2.1.2.6 Déficit hídrico no solo

O déficit de água no solo, nos quatro tratamentos onde a irrigação foi suspensa, foi calculado pela Equação 2, utilizando a metodologia proposta por Berliner e Oosterhuis (1978):

$$\text{Déficit} = \left[1 - \frac{\theta_{\text{atual}} - \theta_{\text{PMP}}}{\theta_{\text{CC}} - \theta_{\text{PMP}}} \right] \times 100\% \quad (2)$$

em que

$$\theta_{CC} = \text{umidade do solo na capacidade de campo, m}^3 \text{ m}^{-3};$$

$$\theta_{\text{atual}} = \text{umidade atual do solo em cada tratamento, m}^3 \text{ m}^{-3};$$

$$\theta_{\text{PMP}} = \text{umidade do solo no ponto de murcha permanente, m}^3 \text{ m}^{-3}.$$

Considerou-se como déficit hídrico prejudicial a cultura, para fins de análise, os valores de déficits maiores que o déficit hídrico de manejo (MAD = 50%).

2.1.3 Resultados e discussão

2.1.3.1 Avaliação dos dados climáticos observados

Na Figura 2.1.1 apresenta-se uma síntese dos dados climáticos observados durante a duração dos experimentos 1 e 2.

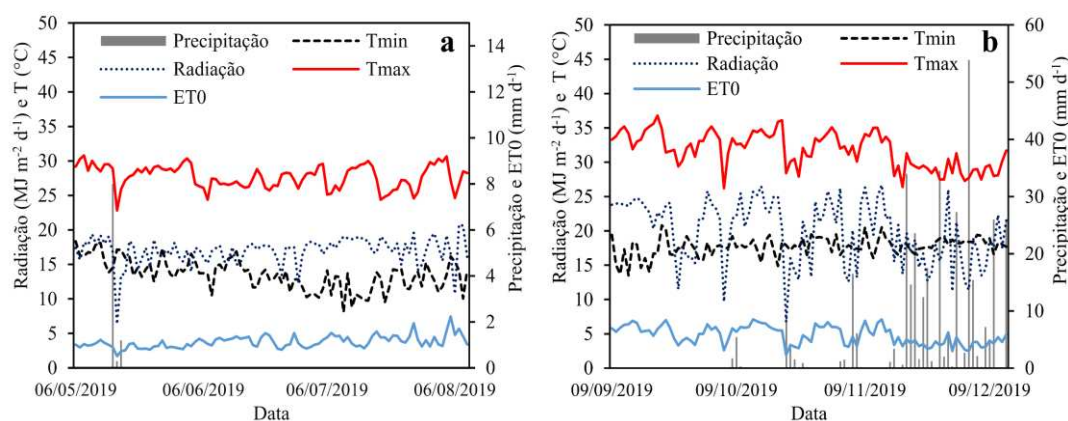


Figura 2.1.1. Temperaturas máxima (Tmax) e mínima (Tmin) do ar, radiação solar, precipitação e evapotranspiração de referência (ET₀) ocorridas nos experimentos 1 (a) e 2 (b) durante o cultivo de soja.

Durante o experimento 1, foram observados três eventos chuvosos, ocorridos logo após o plantio da cultura, antes da emergência da planta, totalizando 9,5 mm. No experimento 2, foram observados 47 eventos chuvosos, com o primeiro evento ocorrido 10 dias após a emergência da cultura, e maiores frequências de precipitação a partir dos 71 dias após o plantio, totalizando 417,5 mm. No experimento 1, a ET₀ variou de 1,7 a 7,4 mm d⁻¹, atingindo seu valor máximo no mês de agosto.

No experimento 2, os valores de ET₀ variaram de 1,9 a 7,1 mm d⁻¹. A temperatura média do ar variou de 16,9 a 23,2 °C no experimento 1 e de 20,4 a 28,1 °C no experimento 2. A radiação solar variou de 6,4 a 20,8 MJ m⁻² d⁻¹ no experimento 1, sendo o maior valor observado no mês de agosto; já no experimento 2, a radiação variou de 6,7 a 27,0 MJ m⁻² d⁻¹, com maior valor encontrado no mês de dezembro. A média de horas de luz durante o experimento 2 foi de 9 h d⁻¹ e no experimento 1 foi de 7 h d⁻¹.

2.1.3.2 Efeito do déficit hídrico na altura da planta, área foliar e biomassa

Na Figura 2.1.2 apresenta-se, para os experimentos 1 (a) e 2 (b), o comportamento da altura média de planta (AMP) em função do estágio de desenvolvimento em que a cultura se encontrava quando a irrigação foi suspensa. Observou-se que houve, nos dois experimentos, diferença estatística entre os tratamentos ($p < 0,05$).

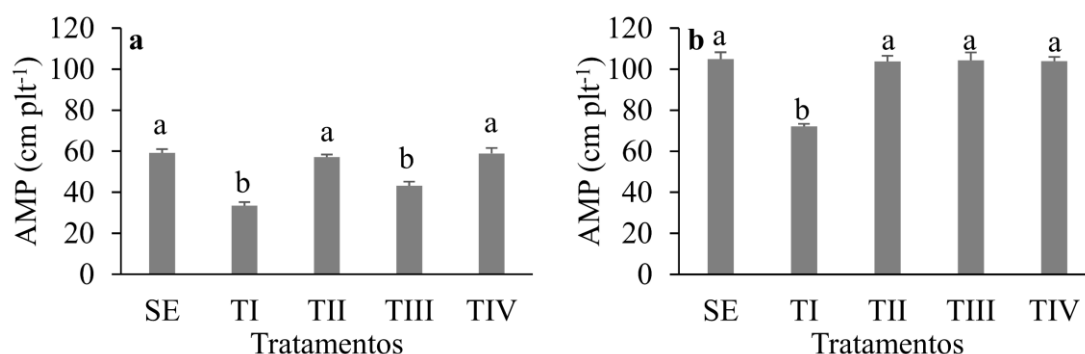


Figura 2.1.2. Valores médios de altura de planta de soja observados nos diferentes tratamentos (SE, TI, TII, TIII e TIV) dos experimentos 1 (a) e 2 (b). SE = sem déficit hídrico (irrigação completa em todos os estádios); TI = déficit hídrico aplicado (irrigação suspensa) no estágio VC-V4; TII = déficit hídrico aplicado no estágio V5-R1; TIII = déficit hídrico aplicado no estágio R1-R5; TIV = déficit hídrico aplicado no estágio R5-R7; AMP = altura média de planta; plt = planta. Letras diferentes na barra de cada tratamento representam diferenças significativas entre os tratamentos após ANOVA (teste de Tukey, $p < 0,05$).

No experimento 1 (Figura 2.1.2a), em comparação ao SE, observou-se que quando o déficit foi aplicado nos estádios VC-V4 (TI) e R1-R5 (TIII) a AMP sofreu reduções da ordem de 43,4 e 27,1%, respectivamente. Os tratamentos TII e TIV apresentaram reduções AMP de 3,5 e 0,5%, respectivamente, porém, não se observou diferença estatística entre alturas de plantas obtidas nesses tratamentos com o tratamento controle (SE). Comparando-se os valores de AMP dentro de cada tratamento, observou-se que o tratamento TI, com AMP igual a 33,5 cm, foi o mais impactado com o déficit hídrico aplicado e o tratamento TIV, com AMP igual a 58,9 cm, foi o menos impactado. No experimento 2 (Figura 2.1.2b) observou-se que o tratamento TI sofreu redução na AMP da ordem de 31,2%. Os valores de AMP nos tratamentos SE, TII, TIII e TIV foram estatisticamente iguais. Comparando-se os experimentos, nota-se que a AMP do experimento 2 foi maior em 24,6%, 40,5%, 26%, 35,8% e 45% nos tratamentos SE, TI, TII, TIII e TIV, respectivamente, que no experimento 1.

A diminuição da AMP observada nos tratamentos TI e TIII, do experimento 1, e no tratamento TI, do experimento 2, pode ser atribuída ao tempo de aplicação do déficit hídrico: 20 e 23 dias nos tratamentos TI e TIII, do experimento 1, respectivamente, e 22 dias no tratamento TI, do experimento 2. Além disso, durante a aplicação do déficit nesses tratamentos a planta estava no estágio inicial de desenvolvimento, momento em que a planta se encontra em pleno processo de crescimento celular (WIJEWARDANA et al., 2019). Durante o experimento 1 e 2, o déficit hídrico aplicado no tratamento TII teve duração de 6 dias, podendo não ter sido o suficiente para influenciar na altura média de plantas. No caso do tratamento TIV, no experimento 1, uma possível explicação para o déficit hídrico, apesar do período longo (32 dias), não ter influenciado a altura média de plantas, é o fato de que a planta já tinha atingido completamente o desenvolvimento vegetativo, quando se iniciou o déficit hídrico. A altura é um dos indicadores mais importantes de crescimento e desenvolvimento das plantas, pois reflete a taxa de crescimento, além de indicar a tolerância da planta ao estresse hídrico (DONG et al., 2019; KU et al., 2013; KHAN et al., 2014). Porém, embora o estresse hídrico afete a maioria das funções de crescimento das plantas, isso depende da quantidade de dias em que a planta é submetida ao déficit hídrico, além de estar relacionado com o tipo de material genético da planta estudada (BOUTRAA et al., 2010).

No experimento 1, observou-se no tratamento SE uma AMP igual a 59,2 cm e, no experimento 2, de 105 cm, diferença percentual de 43,6%. No caso dos tratamentos TI, TII, TIII e TIV, a AMP desses tratamentos, no experimento 1, foram iguais 33,5 cm, 57,1 cm, 43,1 cm e 59 cm, respectivamente, valores menores em 53,6%, 45%, 58,6% e 43,3% respectivamente, que os valores observados no experimento 2. Essa diferença pode ser atribuída as condições climáticas, principalmente na quantidade de horas de luz e temperatura máxima do ar, que exercem grande influência no desenvolvimento da cultura da soja (FARIAS et al., 2007; FERREIRA et al., 2007; KANTOLIC, 2008; SOUZA et al., 2013).

Na Figura 2.1.3, apresenta-se o comportamento da área foliar e biomassa da soja em função do estágio em que o estresse hídrico foi aplicado durante os experimentos 1 e 2. Observou-se que houve, nos dois experimentos, diferença estatística entre os tratamentos ($p < 0,05$).

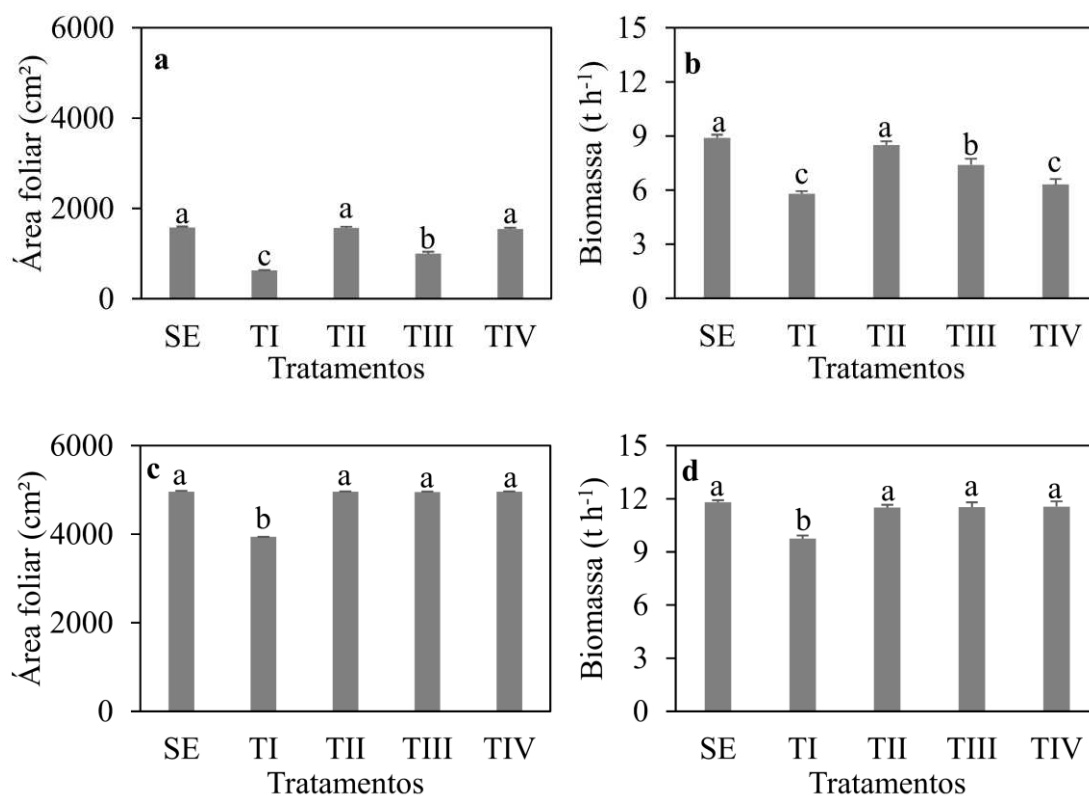


Figura 2.1.3. Valores médios de área foliar (a e c) e biomassa (b e d) de soja observados nos diferentes tratamentos (SE, TI, TII, TIII e TIV) dos experimentos 1 e 2. SE = sem déficit hídrico; TI = déficit hídrico aplicado no estágio VC-V4; TII = déficit hídrico aplicado no estágio V5-R1; TIII = déficit hídrico aplicado no estágio R1-R5; TIV = déficit hídrico aplicado no estágio R5-R7. Letras diferentes na barra de cada tratamento representam diferenças significativas entre os tratamentos após ANOVA (teste de Tukey, $p < 0,05$).

No experimento 1, observou-se reduções na área foliar (Figura 2.1.3a) de 60,2% e 36,7%, respectivamente, em função do déficit hídrico aplicado durante os estádios VC-V4 (TI) e R1-R5 (TIII). Constatou-se reduções nos valores de área foliar iguais a 0,42% e 2,12% em TII (V5-R1) e TIV (R5-R7), respectivamente. A área foliar média da cultura da soja no tratamento TIV foi maior em 59,3% e 35,3% que a área foliar média observada nos tratamentos TI e TIII, respectivamente. No experimento 2 (Figura 2.1.3c), observou-se redução na área foliar média da soja no tratamento TI igual a 20,6%; os valores de área foliar da soja nos tratamentos SE, TII, TIII e TIV foram estatisticamente iguais.

Uma possível explicação para a redução da área foliar observada nos tratamentos TI e TIII, do experimento 1, e no tratamento TI, do experimento 2, é que, nesses tratamentos, quando os déficits foram aplicados, as plantas ainda se encontravam no estágio de desenvolvimento vegetativo. Já no tratamento TIV, não foi observado redução na área foliar devido ao fato de que quando o déficit hídrico foi

aplicado as plantas já tinham concluído o desenvolvimento vegetativo. No caso do tratamento TII, a duração do déficit não foi suficientemente grande para influenciar no desenvolvimento da área foliar da planta. Alguns estudos (WIJEWARDANA et al., 2019; KHAN et al., 2014; DONG et al., 2019) relataram reduções significativas na área foliar de soja submetida a estresse hídrico, o que pode ser explicado pela desidratação do protoplasma, declínio na turgidez e perda de turgor, além da redução da divisão celular (ARNON, 1972; LUDLOW; MUCHOW, 1990). O tratamento TIII não apresentou redução na área foliar no experimento 2, e isto pode ter sido por causa das chuvas que ocorreram durante o momento de aplicação do déficit hídrico nesse tratamento.

No experimento 1, observou-se no tratamento SE uma área foliar igual a 1579 cm² e, no experimento 2, de 4964,5 cm², diferença percentual de 68,2%. No caso dos tratamentos TI, TII, TIII e TIV, a área foliar desses tratamentos, no experimento 1, foram iguais a 628,5 cm², 1572,1 cm², 999 cm² e 1544 cm², respectivamente, valores menores em 84%, 68,3%, 80% e 69% respectivamente, que os valores observados no experimento 2. Essa diferença pode ser atribuída as condições climáticas, principalmente na quantidade de horas de luz e temperatura máxima do ar, que exercem grande influência no desenvolvimento da cultura da soja (FARIAS et al., 2007; FERREIRA et al., 2007; KANTOLIC, 2008; SOUZA et al., 2013).

Na Figura 2.1.3b, observa-se, no experimento 1, reduções significativas na biomassa média da soja nos tratamentos TI, TIII e TIV, com diminuição da ordem de 34,8%, 16,9% e 29%, respectivamente. A biomassa no tratamento TII apresentou redução igual a 4,5%, não diferindo estatisticamente do tratamento controle (SE). Comparando os valores de biomassa entre os tratamentos com déficit hídrico, observou-se que o tratamento TIII apresentou valores médios de biomassa 21,2% e 14,6% maiores que os observados nos tratamentos TI e TIV, respectivamente. Já o tratamento TII apresentou valores de biomassa superior aos tratamentos TI (31,8%), TIII (13%) e TIV (25,6 %). No experimento 2 (Figura 2.1.3d), observou-se redução na biomassa da soja (17,4%) apenas no tratamento TI. Os valores de biomassa nos tratamentos SE, TII, TIII e TIV foram estatisticamente iguais.

O impacto do déficit hídrico na biomassa da soja nos tratamentos TI e TIII do experimento 1, e no tratamento TI, do experimento 2, pode estar relacionado a quantidade de dias sem irrigação, que foram iguais a 20, 23 e 22 dias respectivamente. No caso do tratamento TIV, do experimento 1, houve uma diminuição da biomassa,

devido ao não enchimento de grãos causado pela suspensão da irrigação durante 32 dias. Nestes tratamentos o processo de assimilação de matéria seca pode ter sido afetado, e as plantas podem ter passado a modular as taxas de expansão celular a valores menores. Mesmo após a retomada da irrigação, como ocorreu nos tratamentos TI e TIII, esse processo de modulação da expansão celular pode ter continuado (SASEENDRAN et al., 2015). Estudos comprovaram a redução das características de crescimento e desenvolvimento da planta de soja em função da aplicação do déficit hídrico (DEMIRTAS et al., 2010; IQBAL et al., 2018; WIJEWARDANA et al., 2018).

No experimento 1, observou-se no tratamento SE uma biomassa igual a 8,9 t ha⁻¹ e, no experimento 2, de 11,8 t ha⁻¹, diferença percentual de 24,6%. No caso dos tratamentos TI, TII, TIII e TIV, a biomassa desses tratamentos, no experimento 1, foram iguais a 5,8 t ha⁻¹, 8,5 t ha⁻¹, 7,4 t ha⁻¹ e 6,3 t ha⁻¹, respectivamente, valores menores em 40,5%, 26%, 35,8% e 45,3% respectivamente, que os valores observados no experimento 2. Essa diferença pode ser atribuída as condições climáticas, principalmente na quantidade de horas de luz e temperatura máxima do ar, que exercem grande influência no desenvolvimento da cultura da soja (FARIAS et al., 2007; FERREIRA et al., 2007; KANTOLIC, 2008; SOUZA et al., 2013).

2.1.3.3 Efeito do déficit hídrico no comprimento do sistema radicular e relação raiz/parte aérea

No experimento 1, verificou-se que o comprimento do sistema radicular nos tratamentos variou entre 34,9 e 35,2 cm. Já no experimento 2, o comprimento da raiz variou entre 35,4 e 36,12 cm. Nota-se que a variação no comprimento foi em média de 0,5 cm, o que demonstram que os déficits aplicados não foram suficientes para alterar o comprimento da raiz. Outro aspecto importante que merece ser melhor avaliado é se o sistema de irrigação por gotejamento enterrado exerce algum controle sobre o crescimento radicular. No presente estudo, as mangueiras de irrigação estavam enterradas a 28 cm de profundidade, o que pode ter contribuído para uniformizar o crescimento de raízes.

Na Figura 2.1.4, estão apresentados o peso seco da raiz por planta (PSR) e a relação raiz/parte aérea (RRP) da cultura da soja sob déficit hídrico durante os experimentos 1 e 2. Observou-se que houve, nos dois experimentos, diferença estatística entre os tratamentos ($p < 0,05$).

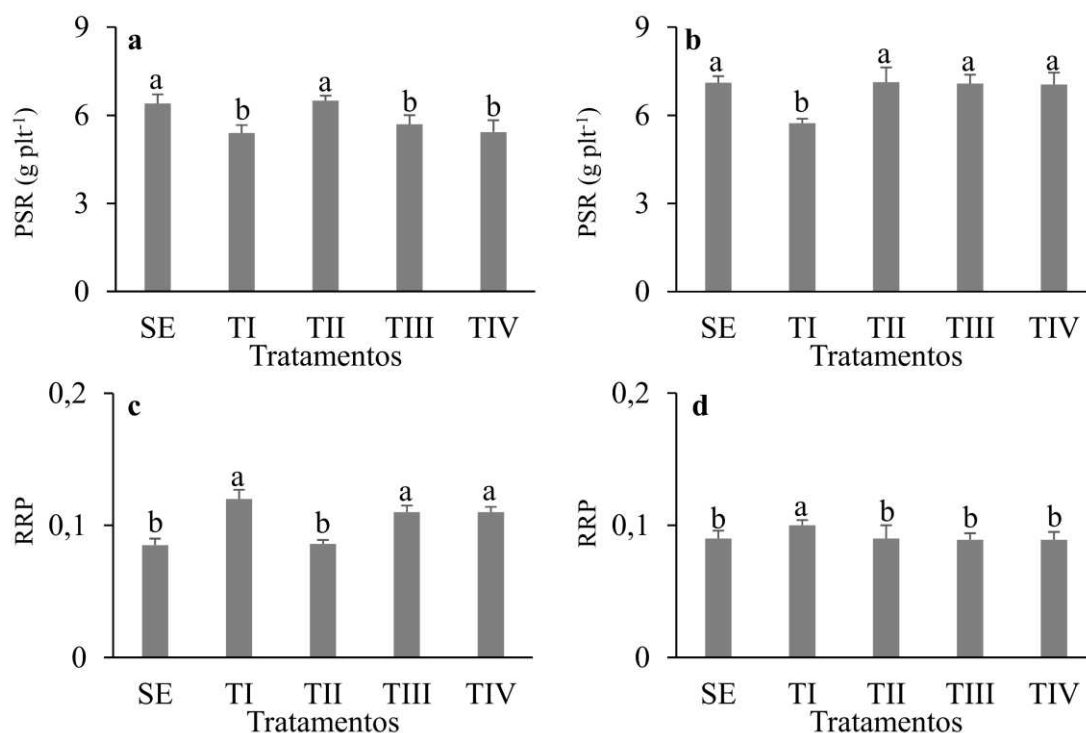


Figura 2.1.4. Valores médios de peso seco da raiz (a e b) e de relação raiz/parte aérea (c e d) de soja observados nos diferentes tratamentos (SE, TI, TII, TIII e TIV) dos experimentos 1 e 2. SE = sem déficit hídrico; TI = déficit hídrico aplicado no estágio VC-V4; TII = déficit hídrico aplicado no estágio V5-R1; TIII = déficit hídrico aplicado no estágio R1-R5; TIV = déficit hídrico aplicado no estágio R5-R7; PSR = peso seco médio de raiz; RRP = média da relação raiz/parte aérea; plt = planta. Letras diferentes na barra de cada tratamento representam diferenças significativas entre os tratamentos após ANOVA (teste de Tukey, $p < 0,05$).

Os maiores pesos secos de raiz por planta, no experimento 1 (Figura 2.1.4a), foram observados nos tratamentos SE e TII. Nos tratamentos TI, TIII e TIV, observou-se redução nos pesos de raiz da ordem de 15,6%, 10,8% e 17%, respectivamente, em comparação com o tratamento controle. Valores maiores da RRP foram observados nos tratamentos TI, TIII e TIV, com valores 29%, 23% e 23% maiores que os observados no tratamento controle (Figura 2.1.4c). Os valores de RRP foram estatisticamente iguais e menores nos tratamentos SE e TII. No experimento 2 (Figura 2.1.4b), observou-se uma redução no PSR de 19,4%, no tratamento TI. Os PSR foram estatisticamente iguais nos tratamentos SE, TII, TIII e TIV. No experimento 2, a RRP observada no tratamento TI foi a maior (Figura 2.1.4d). Os valores de RRP observados nos tratamentos SE, TII, TIII e TIV foram iguais estatisticamente.

Apesar de não se ter observado altas reduções (<17%) nos pesos secos médios de raiz, os tratamentos TI, TIII e TIV, do experimento 1, e o tratamento TI, do experimento 2, foram os que apresentaram a maior RRP, o que indica que o peso seco

da parte aérea foi mais impactado pelo déficit hídrico do que o peso seco da raiz, corroborando com o resultado apresentado por Wu et al. (2018) para a soja nas condições da China.

No experimento 1, observou-se no tratamento SE um PSR igual a $6,4 \text{ g planta}^{-1}$ e, no experimento 2, de $7,1 \text{ g planta}^{-1}$, diferença percentual de 10%. No caso dos tratamentos TI, TII, TIII e TIV, o PSR desses tratamentos, no experimento 1, foram iguais a $5,4 \text{ g planta}^{-1}$, $6,5 \text{ g planta}^{-1}$, $5,7 \text{ g planta}^{-1}$ e $5,4 \text{ g planta}^{-1}$, respectivamente, valores menores em 40,5%, 26%, 35,8% e 45,3% respectivamente, que os valores observados no experimento 2. Essa diferença pode ser atribuída as condições climáticas, principalmente na quantidade de horas de luz e temperatura máxima do ar, que exercem grande influência no desenvolvimento da cultura da soja (FARIAS et al., 2007; FERREIRA et al., 2007; KANTOLIC, 2008; SOUZA et al., 2013).

2.1.3.4 Efeito do déficit hídrico no peso de grãos e na produtividade

Na Figura 2.1.5 apresenta-se os valores de peso de 1000 grãos (P1000) observados nos tratamentos SE, TI, TII, TIII e TIV, dos experimentos 1 (a) e 2 (b). Observou-se que houve, nos dois experimentos, diferença estatística entre os tratamentos ($p < 0,05$).

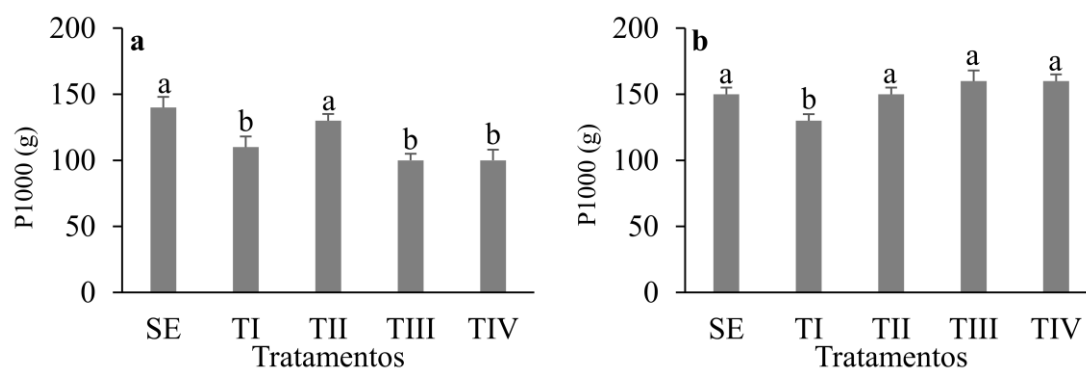


Figura 2.1.5. Valores médios de peso de 1000 grãos (P1000) de soja observados nos tratamentos (SE, TI, TII, TIII e TIV) dos experimentos 1 (a) e 2 (b). SE = sem déficit hídrico; TI = déficit hídrico aplicado no estágio VC-V4; TII = déficit hídrico aplicado no estágio V5-R1; TIII = déficit hídrico aplicado no estágio R1-R5; TIV = déficit hídrico aplicado no estágio R5-R7. Letras diferentes na barra de cada tratamento representam diferenças significativas entre os tratamentos após ANOVA (teste de Tukey, $p < 0,05$).

No experimento 1 (Figura 2.1.5a), os maiores valores de P1000 foram obtidos nos tratamentos SE e TII. Nos tratamentos TI, TIII e TIV, observou-se reduções de 21,43%, 28,6% e 28,6% nos valores de P1000, respectivamente, quando comparado ao tratamento controle. No experimento 2 (Figura 2.1.5b), os valores de P1000

observados no tratamento TI foi 13,3% menor; já nos tratamentos SE, TII, TIII e TIV, os valores médios de P1000 grãos foram estatisticamente iguais.

A redução do P1000 observada nos tratamentos TI, TIII, do experimento 1, e TI, do experimento 2, está relacionada ao déficit hídrico aplicado. Além disso, a diminuição da área foliar e da biomassa, pode ter contribuído para a redução do acúmulo e translocação de biomassa para os grãos (NEUMAIER et al., 2000), já que durante o período vegetativo, as hastes e folhas são a principal fonte de produção fotossintética e quando o acúmulo de matéria seca aumenta em certa medida, transfere esses produtos fotossintéticos para a semente (WEI et al., 2018). No caso do tratamento TIV, o déficit hídrico pode ter afetado a produção de grãos por planta, fazendo com que as plantas apresentassem vagens desenvolvidas, porém, sem grãos. Karam et al. (2005), estudando o efeito do déficit hídrico na soja, observaram que quando o déficit ocorreu no estágio de enchimento de vagens houve uma redução de 20% no peso de sementes. Redução de 13,4% no peso de 1000 grãos foi constatada por Dogan et al. (2007) quando submeteram a soja ao déficit hídrico durante o estágio de enchimento de grãos. Os tratamentos TIII e TIV do experimento 2, sofreram influência da ocorrência de chuvas e, portanto, não sofreram déficit hídrico, não havendo impacto no peso de 1000 grãos.

No experimento 1, observou-se no tratamento SE um P1000 igual a 140 g e, no experimento 2, de 150 g, diferença percentual de 7%. No caso dos tratamentos TI, TII, TIII e TIV, o P1000 desses tratamentos, no experimento 1, foram iguais a 110 g, 130 g, 100 g e 100 g, respectivamente, valores menores em 15,4%, 13,3%, 37,5% e 37,5% respectivamente, que os valores observados no experimento 2. Essa diferença pode ser atribuída as condições climáticas, principalmente na quantidade de horas de luz e temperatura máxima do ar, que exercem grande influência no desenvolvimento da cultura da soja (FARIAS et al., 2007; FERREIRA et al., 2007; KANTOLIC, 2008; SOUZA et al., 2013).

Na Figura 2.1.6, apresenta-se valores de produtividade obtida nos tratamentos SE, TI, TII, TIII e TIV durante os experimentos 1 e 2. Observou-se que houve, nos dois experimentos, diferença estatística entre os tratamentos ($p < 0,05$).

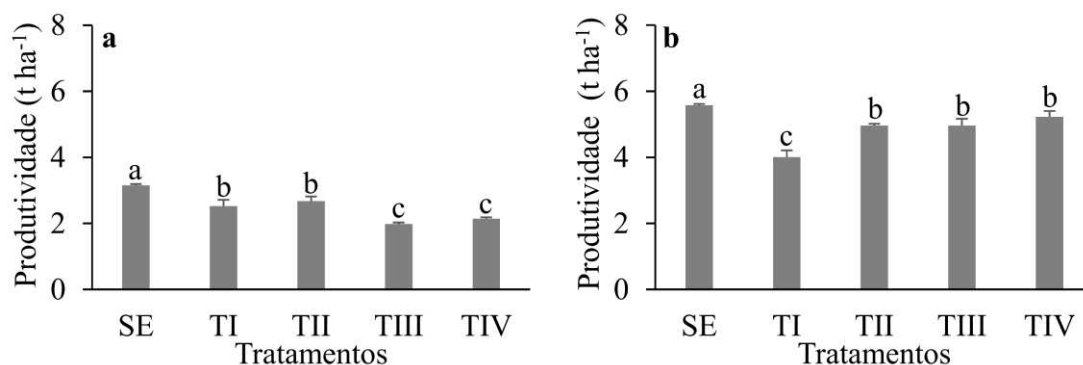


Figura 2.1.6. Valores médios de produtividade da soja observados nos diferentes tratamentos (SE, TI, TII, TIII e TIV) dos experimentos 1 (a) e 2 (b). SE = sem déficit hídrico; TI = déficit hídrico aplicado no estágio VC-V4; TII = déficit hídrico aplicado no estágio V5-R1; TIII = déficit hídrico aplicado no estágio R1-R5; TIV = déficit hídrico aplicado no estágio R5-R7. Letras diferentes na barra de cada tratamento representam diferenças significativas entre os tratamentos após ANOVA (teste de Tukey, $p < 0,05$).

No experimento 1 (Figura 2.1.6a), a maior produtividade foi obtida no tratamento sem déficit hídrico. Nos tratamentos TI, TII, TIII e TIV, observou-se reduções nas produtividades de 20, 15, 37 e 32%, respectivamente. Não foram observadas diferenças estatísticas entre os rendimentos obtidos nos tratamentos TI e TII e nem entre TIII e TIV. No experimento 2 (Figura 2.1.6b), a maior produtividade, também, foi observada no tratamento SE. Não foram observadas diferenças estatísticas entre as produtividades obtidas nos tratamentos TII, TIII e TIV, sendo os valores observados nesses tratamentos menores que o observado no tratamento controle em 11%, 11% e 6.3%, respectivamente. Observou-se uma redução de 28,1% na produtividade colhida no tratamento TI, quando comparado a produtividade da soja obtida no tratamento SE.

Os menores valores de produtividade nos tratamentos TIII e TIV do experimento 1, podem ser explicados pelo fato de que nesses tratamentos, o déficit hídrico foi aplicado quando as plantas se encontravam nos estádios de formação de vagem e enchimento de grãos, respectivamente. Durante esses estádios de desenvolvimento, a cultura é muito sensível ao estresse hídrico. Além disso, a duração do déficit hídrico, em função da duração desses estádios, foi maior nesses dois tratamentos, 23 e 24 dias, respectivamente. Quanto maior a intensidade do estresse hídrico, maior é o comprometimento das funções metabólicas da cultura correlacionadas com a diminuição do ATP (PARRY et al., 2002) que ocorre devido à redução do transporte de elétrons e fotofosforilação (CATUCHI et al., 2011). Além

disso, em condições de déficit hídrico o tilacóide pode sofrer danos estruturais causados pela diminuição do teor de água (LAWLOR; CORNIC, 2002), resultando na diminuição da eficiência do aparelho fotossintético das plantas, causando a redução da produtividade. Vários autores observaram uma forte redução no rendimento da cultura de soja quando o déficit hídrico ocorreu naqueles estádios (MIMI et al., 2016; HE et al., 2017; WIJewardana et al., 2018; KUNERT et al., 2016). Nos tratamentos TI (VC-V4) e TII (V5-R1), observou-se uma redução na produtividade da cultura de 20% e 15%, respectivamente, quando comparado ao tratamento SE. No experimento 2, a menor produtividade foi observada no tratamento TI, sendo esse resultado diferente do observado no experimento 1, o que pode ser explicado, pela ocorrência de chuvas durante o período, suprimindo, em parte, as necessidades hídricas da cultura nos tratamentos TIII e TIV.

No experimento 1, observou-se no tratamento SE um rendimento máximo de 3153,5 kg ha⁻¹ e, no experimento 2, de 5576,5 kg ha⁻¹, diferença percentual de 43,4%. Essa diferença pode ser atribuída as condições climáticas, principalmente na quantidade de horas de luz e temperatura máxima do ar, que exercem grande influência no desenvolvimento da cultura da soja (FARIAS et al., 2007; FERREIRA et al., 2007; KANTOLIC, 2008; SOUZA et al., 2013). No experimento 2, observou-se temperatura máxima média igual 31,6°C, cerca de 12,3% maior que no experimento 1 e a quantidade média de radiação por dia igual a 19,9 MJ m⁻² d⁻¹, valor cerca de 14,9 % maior que no experimento 1. Além disso, no experimento 1 a média diária de horas de luz foi de 7 h d⁻¹, valor 24% menor que o observado no experimento 2.

2.1.3.5 Déficit hídrico no solo e sua correlação com a produtividade e o peso de 1000 grãos

Na Figura 2.1.7 apresenta-se os valores de déficit hídrico no solo observados em cada tratamento do experimento 1.

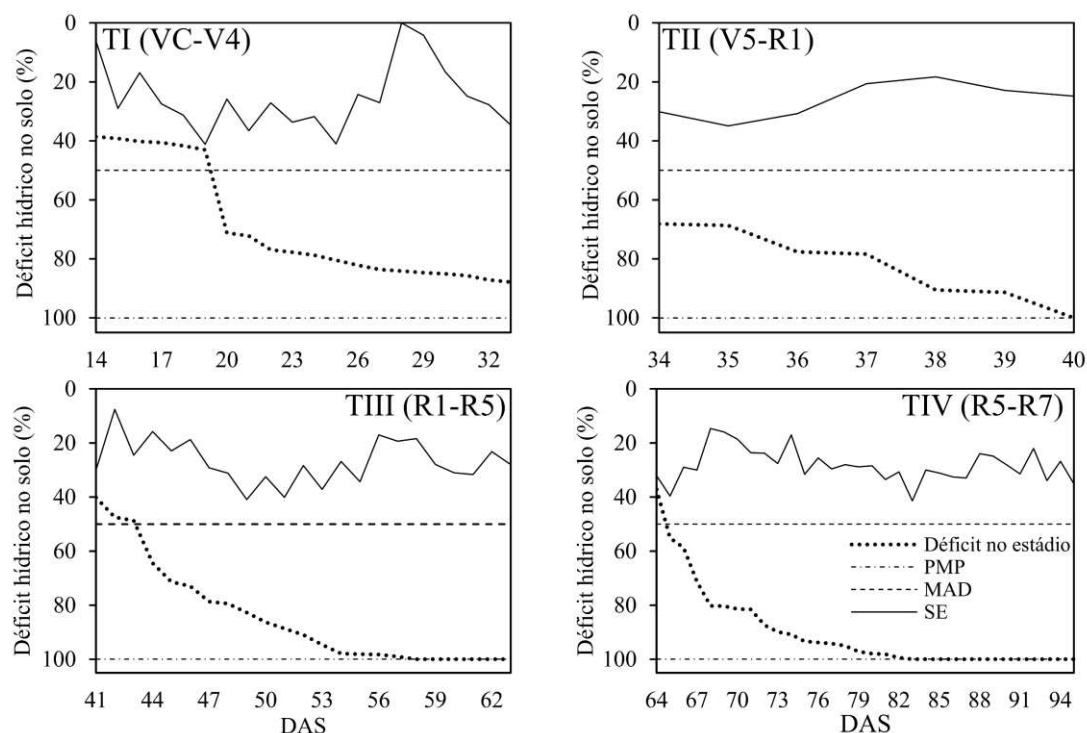


Figura 2.1.7. Comportamento do déficit hídrico no solo observado nos diferentes tratamentos (SE, TI, TII, TIII e TIV) do experimento 1, ao longo do ciclo da cultura da soja. SE = sem déficit hídrico; TI = déficit hídrico aplicado no estágio VC-V4; TII = déficit hídrico aplicado no estágio V5-R1; TIII = déficit hídrico aplicado no estágio R1-R5; TIV = déficit hídrico aplicado no estágio R5-R7. PMP – ponto de murcha permanente (15 atm); MAD – déficit de manejo; DAS – dias após a semeadura.

O déficit máximo permitido ocorrer no manejo de irrigação (MAD), de forma a não haver comprometimento da produtividade da cultura, é 50%. Valores de déficits hídricos no solo maiores que MAD podem comprometer a produtividade. No tratamento SE, observou-se que o déficit hídrico no solo variou da condição de não déficit (0%) a 41,4%, com valor médio igual a 27%. No tratamento TI, observou-se que o déficit hídrico variou de 39% a 88%, com valor médio durante o estágio VC-V4 igual a 69%. No tratamento TII, observou-se que o déficit hídrico variou de 68% a 100%, com valor médio durante o estágio V5-R1 igual a 84%. No tratamento TIII, observou-se que o déficit hídrico variou de 40,1% a 100%, com valor médio durante o estágio R1-R5 igual a 84,3%. No tratamento TIV, observou-se que o déficit hídrico variou de 55,2% a 100%, com valor médio durante o estágio R5-R7 igual a 92%. Os maiores períodos sem aplicação de água ocorreram nos tratamentos TI, TIII e TIV que ficaram sem irrigação durante 20, 23 e 32 dias, respectivamente. Em termos de déficit hídrico no solo, a pior situação ocorreu no TIV que ficou 29 dias com valores de umidade do solo próximos ao ponto de murcha permanente.

Na Figura 2.1.8 apresenta-se os valores de déficit hídrico no solo observados em cada tratamento do experimento 2.

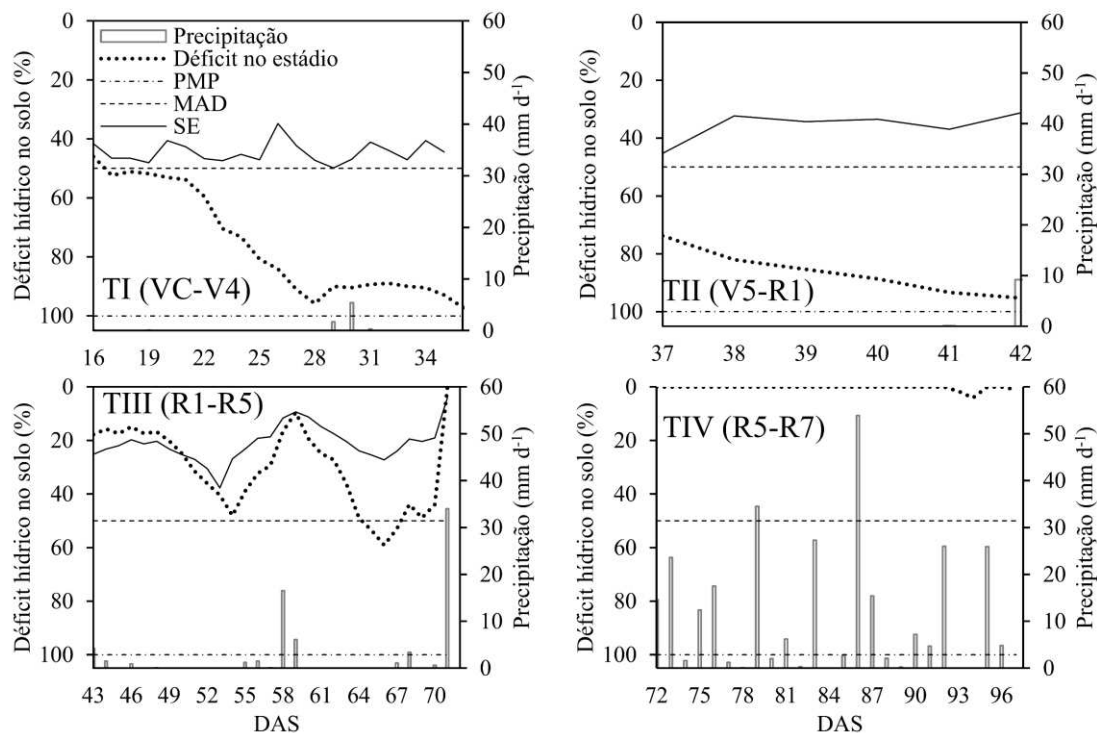


Figura 2.1.8. Comportamento do déficit hídrico no solo observado nos diferentes tratamentos (SE, TI, TII, TIII e TIV) do experimento 2, ao longo do ciclo da cultura da soja. SE = sem déficit hídrico; TI = déficit hídrico aplicado no estádio VC-V4; TII = déficit hídrico aplicado no estádio V5-R1; TIII = déficit hídrico aplicado no estádio R1-R5; TIV = déficit hídrico aplicado no estádio R5-R7. PMP – ponto de murcha permanente (15 atm); MAD – déficit de manejo; DAS – dias após a sementeira.

No experimento 2, no tratamento SE, o déficit hídrico no solo variou da condição de não déficit (0%) a 50%, com valor médio igual a 21,3%. No tratamento TI, observou-se que o déficit hídrico variou de 46% a 99,8%, com valor médio durante o estádio VC-V4 igual a 76,9%. No tratamento TII, observou-se que o déficit hídrico variou de 74% a 95,3%, com valor médio durante o estádio V5-R1 igual a 86,4%. No tratamento TIII, observou-se que o déficit hídrico variou de 10% a 59%, com valor médio durante o estádio R1-R5 igual a 31,7%. No tratamento TIV, observou-se que o déficit hídrico variou de 0% a 8,3%, com valor médio durante o estádio R5-R7 igual a 0,87%. O maior período sem aplicação de água ocorreu no tratamento TI, que ficou sem irrigação durante 22 dias.

O conteúdo de água no solo diminuiu gradualmente para o limite correspondente ao PMP nos tratamentos TII, TIII e TIV, do experimento 1, atingindo assim o déficit hídrico de 100%. No experimento 2, este comportamento do déficit hídrico foi visto apenas no tratamento TI, mas não chegou a alcançar 100% de déficit

hídrico. Os valores de déficits hídricos no solo observado no tratamento TI, dos experimentos 1 e 2, podem não ter atingido o déficit máximo, apesar de terem ficado 20 e 22 dias sem irrigação, respectivamente, pelo fato das plantas se encontrarem no estágio inicial de desenvolvimento, onde há baixa transpiração.

Apesar de o déficit hídrico no tratamento TII ter atingido 100% no experimento 1, e 95%, no experimento 2, a duração do déficit nesses níveis elevados foi de apenas 1 dia, sendo a irrigação retomada no dia seguinte, ou seja, não houve tempo suficiente para que a planta ficasse exposta por muito tempo a esse nível de déficit. Nos demais tratamentos do experimento 2, devido à ocorrência de chuva, os déficits hídricos ficaram acima do MAD.

Na Figura 2.1.9, apresenta-se as relações entre a produtividade, peso de 1000 grãos e o déficit hídrico no solo observado no tratamento SE, TI, TII, TIII e TIV para os experimentos 1 e 2.

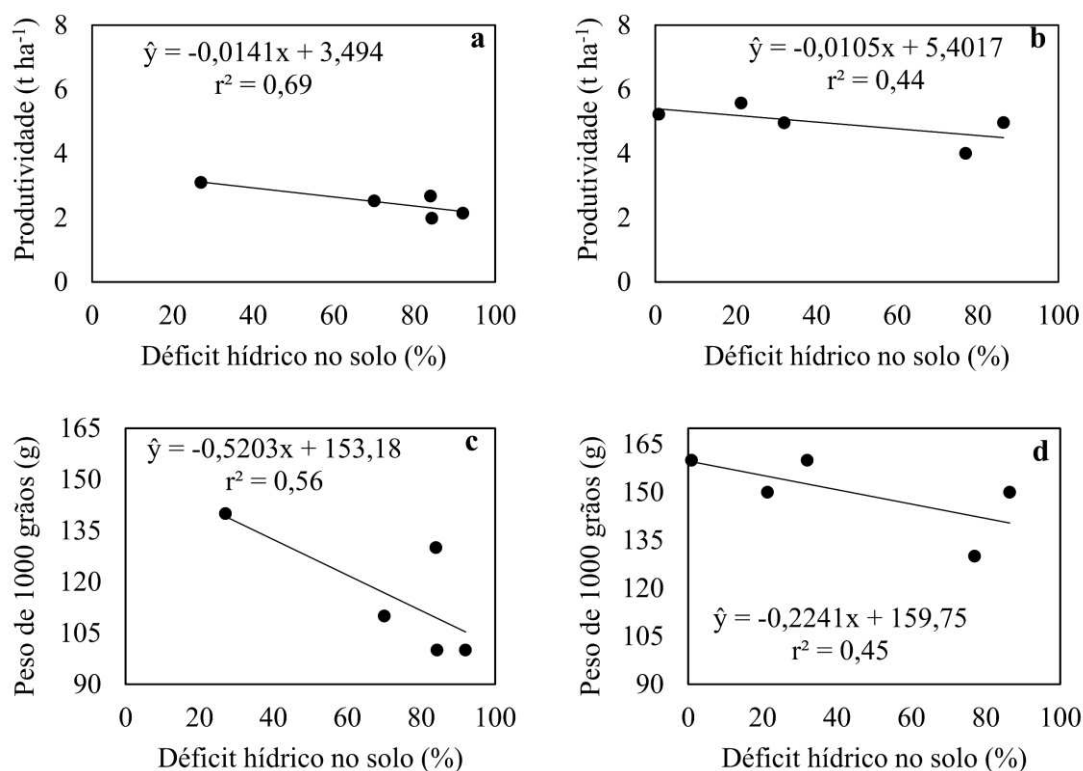


Figura 2.1.9. Relação entre a produtividade e peso de 1000 grãos com o déficit hídrico no solo para o experimento 1 (a e c) e 2 (b e d).

Observou-se que no experimento 1, houve uma correlação linear entre a produtividade e o déficit hídrico no solo (Figura 2.1.9a), com valor de r^2 de 0,69. No experimento 2, houve correlação linear entre a produtividade e o déficit hídrico no solo, com $r^2 < 0,50$ (Figura 2.1.9b). No experimento 1, houve correlação entre o peso

de 1000 grãos e o déficit hídrico no solo, com r^2 de 0,56 (Figura 2.1.9c). No experimento 2, observou-se baixa correlação entre essas variáveis, com r^2 igual a 0,45 (Figura 2.1.9d). Valores de $r^2 > 0,5$, são geralmente considerados como aceitáveis (SANTHI et al., 2001, VAN LIEW et al., 2003). Portanto, os valores de r^2 apresentados no experimento 1, para a correlação entre o déficit hídrico no solo e a produtividade e o peso de 1000 grãos, são considerados aceitáveis, e no experimento 2 os valores de r^2 são considerados inaceitáveis. Analisando o comportamento da produtividade em relação ao déficit hídrico, no experimento 1, observa-se uma redução na produtividade de 50 kg ha⁻¹, para cada 1% de aumento no déficit hídrico. Já para o peso de 1000 grãos, a equação de regressão indicou uma redução de 0,52 g no mesmo experimento.

O efeito do déficit hídrico, em decorrência de um veranico, por exemplo, pode acarretar perdas significativas. Tomando como base o experimento 2, onde a produtividade na condição de déficit hídrico médio de 20% foi da ordem de 5576,6 kg ha⁻¹, em uma área plantada de 100 hectares, a produção seria da ordem de 557.660 kg; Já na condição de déficit de 70%, a produção, nessa mesma área, seria de 400.800 kg, uma diferença de 156.860 kg (2614 sacas). Esse resultado reforça a importância da irrigação para a cultura da soja nessa região.

2.1.4 Conclusões

O déficit hídrico aplicado nos estádios de desenvolvimento VC-V4 e R1-R5 proporcionou uma redução na altura de plantas de 43,4 e 27,1%, respectivamente e uma redução na área foliar da ordem de 60,2% e 36,7%.

A biomassa sofreu redução de 34,8% e 29% nos tratamentos em que os déficits hídricos foram aplicados nos estádios de desenvolvimento VC-V4 e R5-R7.

Nos tratamentos com déficits hídricos aplicados nos estádios de desenvolvimento VC-V4, R1-R5 e R5-R7, as relações raiz/parte aérea foram maiores, quando comparadas ao tratamento controle, em 29%, 23% e 23%, respectivamente.

O déficit hídrico aplicado nos estádios VC-V4, R1-R5 e R5-R7, ocasionou uma redução de 21,4%, 28,6% e 28,6% no peso de 1000 grãos, quando comparado ao tratamento controle.

O déficit hídrico aplicado no estágio R5-R7 acarretou em uma redução de 32% no rendimento final da soja BRS 7581RR.

Constatou-se correlação linear entre o déficit hídrico no solo com o peso de 1000 grãos e com a produtividade.

2.1.5 Referências bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil - 2014: relatório síntese**. Brasília: ANA, 2016. 37 p.

AGROSATÉLITE. **Análise geoespacial da dinâmica da soja no bioma Cerrado: 2014 a 2017**. Florianópolis: Gtc, 2018. 24 p.

ALLEN, E.; VALDES, C. **Brazil's Corn Industry and the Effect on the Seasonal Pattern of U.S. Corn Exports**. AES-93, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, June 2016.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998.

ARNON, I. **Crop Production in Dry Regions, Background, and Principles**; Polunin, N., Ed.; Leonard Hill Book: London, UK, 1972; pp. 203–211.

BERLINER, P. R.; OOSTERHUIS, D. M. Effect of root and water distribution in lysimeters and in the field on the onset of crop water stress. **Irrigation science**, v. 8, n. 4, p. 245-255, 1987.

BOUTRAA, T.; AKHKHA, A.; AL-SHOAIBI, A. A.; ALHEJELI, A. M. Effect of water stress on growth and water use efficiency (WUE) of some wheat cultivars (*Triticum durum*) grown in Saudi Arabia. **Journal of Taibah University for Science**, v. 3, n. 1, p. 39-48, 2010.

CATUCHI, T. A.; VÍTOLO, H. F.; BERTOLLI, S. C.; SOUZA, G. M. Tolerance to water deficiency between two soybean cultivars: transgenic versus conventional. **Ciência Rural**, v. 41, n. 3, p. 373-378, 2011.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. v. 6 - Safra 2018/19, n.5 - Quinto levantamento, fevereiro 2019. Brasília, fev. 2019. 118 p.

DEMIRTAS, Ç.; YAZGAN, S.; CANDOGAN, B. N.; SINCIK, M.; BÜYÜKCANGAZ, H.; GÖKSOY, A. T. Quality and yield response of soybean (*Glycine max* L. Merrill) to drought stress in sub-humid environment. **African Journal of Biotechnology**, v. 9, n. 41, p. 6873-6881, 2010.

DOGAN, E.; KIRNAK, H.; COPUR, O. Deficit irrigations during soybean reproductive stages and CROPGRO-soybean simulations under semi-arid climatic conditions. **Field Crops Research**, 103(2), p. 154-159, 2007.

DONG, S.; JIANG, Y.; DONG, Y.; WANG, L.; WANG, W.; MA, Z.; YAN, C.; MA, C.; LIU, L. A study on soybean responses to drought stress and rehydration. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 26, n. 8, p. 2006-2017, 2019.

FAO (FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION). **OECD-FAO Agricultural Outlook 2015–2024**. Paris: OECD, 2015. 148 p.

FAO (FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION). **The future of food and agriculture – Trends and challenges**. Rome: FAO, 2017. 180 p.

FAPDA (FOOD AND AGRICULTURE POLICY DECISION ANALYSIS). 2014 **Brazil country fact sheet on food and agriculture policy trends**. [s.l.], FAPDA, 2014. 5 p.

FARIAS, J.R.B.; NEPOMUCENO, A.L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: EMBRAPA, (Circular técnica, 48). 2007.

FERERES, E.; SORIANO, M. A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal of Experimental Botany**, [s.l.], v. 58, n. 2, p. 147-159, 6 nov. 2006.

GEERTS, A.; RAES, D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 96, n. 9, p. 1275-1284, set. 2009.

GOUEL, C.; GUIMBARD, H. Nutrition Transition and the Structure of Global Food Demand. **American Journal of Agricultural Economics**, [s.l.], v. 101, n. 2, p. 383-403, 19 jun. 2018.

HE, J.; DU, Y.; WANG, T.; TURNER, N.C.; YANG, R.; JIN, Y.; XI, Y.; ZHANG, C.; CUI, T.; FANG, X. Conserved water use improves the yield performance of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) under drought. **Agricultural Water Management**, v. 179, p. 236-245, 2017.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola – dezembro de 2018**. 2018. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/brasil>. Acesso em: 10 jun. 2020.

IQBAL, N.; HUSSAIN, S.; ZHANG, X.-W.; YANG, C.-Q.; RAZA, M.A.; DENG, J.-C.; AHMAD, S.; ASHGAR, M.A.; ZHANG, J.; YANG, W.; LIU, J. Imbalance water deficit improves the seed yield and quality of soybean. **Agronomy**, v. 8, n. 9, p. 168, 2018.

KARAM, F.; MASAAD, R.; SFEIR, T.; MOUNZER, O.; ROUPHAEL, Y. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 75, n. 3, p. 226-244, jul. 2005.

KHAN, M.S.A.; KARIM, M.A.; HAQUE, M.M. Genotypic differences in growth and ions accumulation in soybean under NaCl salinity and water stress conditions. **Bangladesh Agronomy Journal**, v. 17, n. 1, p. 47-58, 2014.

KÖPPEN, W. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra**. Fondo de Cultura Econômica. México. 1948. 479p.

KU, Y. S.; AU-YEUNG, W. K.; YUNG, Y. L.; LI, M. W.; WEN, C. Q.; LIU, X.; LAM, H. M. **Drought stress and tolerance in soybean. A Comprehensive Survey of Internaitonal Soybean Research—Genetics, Physiology, Agronomy and Nitrogen Relationships**. BoD–Books on Demand, 2013. 614 p.

KUNERT, K.J.; VORSTER, B.J.; FENTA, B.A.; KIBIDO, T.; DIONISIO, G.; FOYER, C.H. Drought stress responses in soybean roots and nodules. **Frontiers in plant science**, v. 7, p. 1015, 2016.

LAWLOR, D.W.; CORNIC, G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. **Plant, cell & environment**, v. 25, n. 2, p. 275-294, 2002.

LUDLOW, M.M.; MUCHOW, R.C. A critical evaluation of traits for improved crop yields in water limited environments. In: **Advances in agronomy**. Academic Press, 1990. p. 107-153.

MALAQUIAS, J.V.; DA SILVA, F. A.M.; EVANGELISTA, B.A. **Precipitação pluviométrica em Planaltina, DF: análise de dados da estação principal da Embrapa Cerrados, 1974 a 2003**. Embrapa Cerrados-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E). 2010.

MEADE, B.; PURICELLI, E.; MCBRIDE, W.; VALDES, C.; HOFFMAN, L.; FOREMAN, L.; DOHLMAN, E. **Corn and soybean production costs and export competitiveness in Argentina, Brazil, and the United States**. EIB-154, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, June 2016.

MIMI, A.; MANNAN, M.A.; KHALIQ, Q.A.; MIA M.B. Yield Response of Soybean (*Glycine max* L.) Genotypes to Water Deficit Stress. **Bangladesh Agronomy Journal**, v. 19, n. 2, p. 51-60, 2016.

MONTOYA, F.; GARCÍA, C.; PINTOS, F.; OTERO, A. Effects of irrigation regime on the growth and yield of irrigated soybean in temperate humid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, v. 193, p. 30-45, 2017.

NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A.L.; FARIAS, J.R.B.; OYA, T. Estádios de desenvolvimento da cultura de soja. In: Bonatto, E.R. (eds.). **Estresses em soja**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000, cap.1, p.19-44

PARRY, M.A.; ANDRALOJC, P.J.; KHAN, S.; LEA, P.J.; KEYS, A.J. Rubisco activity: effects of drought stress. **Annals of botany**, v. 89, n. 7, p. 833-839, 2002.

PATRIGNANI, A.; OCHSNER, T.E. Canopeo: A powerful new tool for measuring fractional green canopy cover. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 6, p. 2312-2320, 2015.

RAGAB, R. Constraints and applicability of irrigation scheduling under limited water resources, variable rainfall and saline conditions. In: Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO) (ed.), **Irrigation Scheduling: from Theory to Practice**. Rome (Italy), 1996. pp. 149–165.

RAMANKUTTY, N.; MEHRABI, Z.; WAHA, K.; JARVIS, L.; KREMEN, C.; HERRERO, M.; RIESEBERG, L. H. Trends in Global Agricultural Land Use: Implications for Environmental Health and Food Security. **Annual review of plant biology**, v. 69, p. 789-815, 2018.

RUIZ SÁNCHEZ, M.C.; DOMINGO, R.; CASTEL, J.R (2010). Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain. **Spanish journal of agricultural research**, n. 2, p. 5-20, 2010.

SANTHI, C, J. G. ARNOLD, J. R. WILLIAMS, W. A. DUGAS, R. SRINIVASAN, AND L. M. HAUCK. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. **J. American Water Resources Assoc.** 37(5): 1169-1188. 2001.

SASEENDRAN, S.A.; TROUT, T.J.; AHUJA, L.R.; MA, L.; MCMASTER, G.S.; NIELSEN, D.C.; ANDALES, A.A.; CHÁVEZ, J.L.; HAM, J. Quantifying crop water stress factors from soil water measurements in a limited irrigation experiment. **Agricultural Systems**, v. 137, p. 191-205, 2015.

SHEWRY, P.R.; HALFORD, N.G. Cereal seed storage proteins: Structures, properties and role in grain utilization. **Journal of experimental botany**, v. 53, n. 370, p. 947-958, 2002.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. Planaltina, Embrapa Cerrados. 416p.

SOUZA P.J.O.P.; SOUZA, A.M.L.; SAMPAIO, L.S. Soybean development and thermal requirement under the climatic conditions of Paragominas, Pará state, Brazil. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 56, n. 4, p. 371-375, 2013.

UNITED NATIONS. (2017). **World population prospects: the 2017 revision, key findings and advance tables**. Work. Pap. No. ESA/P/WP/248, Dep. Econ. Soc. Aff., Popul. Div., New York

USDA. **10º levantamento USDA da safra 2018/19** - Fevereiro/19

VAN DER SPIEGEL, M.; NOORDAM, M.Y.; VAN DER FELLS-KLERX, H.J. (2013). Safety of novel protein sources (insects, microalgae, seaweed, duckweed and rapeseed) and legislative aspects for application in food and feed production. **Comprehensive reviews in food science and food safety**, v. 12, n. 6, p. 662-678, 2013.

VAN LIEW, M. W., T. L. VEITH, D. D. BOSCH, AND J. G. ARNOLD. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: A comparison on USDA-ARS experimental watersheds. **J. Hydrologic Eng.** 12(2): 173-189, 2007.

WEI, Y.; JIN, J.; JIANG, S.; NING, S.; LIU, L. Quantitative response of soybean development and yield to drought stress during different growth stages in the Huaibei Plain, China. **Agronomy**, v. 8, n. 7, p. 97, 2018.

WIJewardana, C.; ALSAJRI, F. A.; IRBY, J. T.; KRUTZ, L. J.; GOLDEN, B.; HENRY, W. B.; WEI, G.; REDDY, K. R. Physiological assessment of water deficit in soybean using midday leaf water potential and spectral features. **Journal of Plant Interactions**, v. 14, n. 1, p. 533-543, 2019.

WIJewardana, C.; REDDY, K.R.; ALSAJRI, F.A.; IRBY, J. T.; KRUTZ, J.; GOLDEN, B. Quantifying soil moisture deficit effects on soybean yield and yield component distribution patterns. **Irrigation science**, v. 36, n. 4-5, p. 241-255, 2018.

WU, W.; MA, B. L.; WHALEN, J. K. Enhancing rapeseed tolerance to heat and drought stresses in a changing climate: perspectives for stress adaptation from root system architecture. In **Advances in Agronomy**. Academic Press. 2018. Vol. 151, pp. 87-157.

2.2 Avaliação do modelo AquaCrop para simulação da produtividade e biomassa de soja sob déficit hídrico aplicado em estágios específicos de crescimento no Cerrado brasileiro

Resumo

O Cerrado brasileiro é responsável por grande parte da produção agrícola do Brasil. Nos últimos anos, o cultivo da soja irrigada tem aumentado nessa região, sendo, portanto, necessário aperfeiçoar as ferramentas que possam auxiliar na gestão de recursos hídricos. O objetivo do presente trabalho foi avaliar o desempenho do modelo AquaCrop para uma nova variedade de soja (BRS 7581RR) submetida a déficits hídricos aplicados por estágio de desenvolvimento. Para isso, dois experimentos foram conduzidos, sendo o primeiro no período de maio a agosto e o segundo de setembro a dezembro de 2019. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados com cinco tratamentos e quatro repetições. No tratamento controle (SE), a irrigação foi realizada de forma a atender a demanda hídrica da cultura em todos os seus estágios de desenvolvimento. Nos demais tratamentos, a irrigação foi suspensa em estágios de desenvolvimento da cultura específicos (TI = VC-V4, TII = V5-R1, TIII = R1-R5 e TIV = R5-R7) e depois retomada. Os resultados mostraram que, após calibrado, o modelo simulou a cobertura vegetal, a biomassa e o rendimento da soja de forma satisfatória, com valores altos de coeficientes de determinação ($r^2 > 0,90$), baixos valores de RMSE e MBE e altos valores de EF. No experimento 1, o conteúdo de água no solo foi superestimado nos tratamentos SE, TI e TIV em 0,24%, 0,78% e 0,23%, respectivamente, e subestimado em 3,3% e 5,5% nos tratamentos TII e TIII, respectivamente. No experimento 2, nos tratamentos SE, TI, TII, TIII e TIV, o conteúdo de água no solo foi subestimado em 6%, 3%, 4,6%, 5,9% e 6,7%, respectivamente. A evapotranspiração atual foi superestimada em todos os tratamentos dos dois experimentos, apresentando valores baixos de r^2 nos experimentos 1 (0,11 – 0,23) e 2 (0,04 – 0,21) e valores negativos de EF.

Palavras-chave: Modelagem agrícola. Manejo de irrigação. Modelagem de água no solo.

2.2.1 Introdução

O Brasil se destaca como produtor e exportador de várias commodities agrícolas. É um dos maiores produtores mundiais de alimento, respondendo por 7,3% das exportações agrícolas mundiais (ALLEN; VALDES, 2016; MEADE et al., 2016; FAPDA, 2014). O país, com exportação da ordem de 79,5 milhões de toneladas na safra agrícola de 2018/2019, é o maior exportador de soja do mundo (USDA, 2019). Nesta mesma safra, a produção foi de 115,34 milhões de toneladas, o que gerou uma receita bruta de R\$ 126,61 bilhões de reais. A soja é a principal *commodity* agrícola brasileira.

No Cerrado brasileiro a soja é uma cultura tipicamente cultivada em condições de sequeiro (DA SILVA et al., 2019), porém ela tem sido cada vez mais cultivada em sistemas irrigados, o que tem contribuído para aumentar a demanda de água na região, que já enfrenta problemas hídricos em algumas de suas principais bacias hidrográficas. Cerca de 64% da área irrigada no Brasil está localizada na região do Cerrado (BRASIL, 2014), que concentra aproximadamente 80% de todos pivôs centrais do Brasil (ALTHOFF; RODRIGUES, 2019). Considerando o atual cenário de uso da água e o aumento das disputas pelo uso de recursos hídricos, é necessário que haja um planejamento adequado da irrigação, principal usuária de recursos hídricos, que considere o crescimento da irrigação no Cerrado, principalmente para a produção de soja. O interessante é que nesse planejamento sejam considerados os possíveis impactos de diferentes estratégias de manejo de irrigação no desenvolvimento sustentável da agricultura da região.

Na avaliação de cenários visando estabelecer estratégias de manejo de recursos hídricos em bacias hidrográficas, a aplicação de modelos computacionais constitui-se em uma valiosa ferramenta, a qual permite ao gestor visualizar os resultados das simulações antes da tomada de decisão. Na literatura pode-se encontrar uma variedade de modelos matemáticos que podem ser utilizados na simulação de estratégias de irrigação, tais como Crop-Syst (STÖCKLE et al., 2003), EPIC (CAVERO et al., 2000; KO; STEGLICH. 2009), DSSAT (JONES et al., 2003), WOFOST (BOOGAARD et al., 1998) e STICS (BRISSON et al., 1998). Esses modelos, entretanto, tem aplicação limitada em regiões carentes de dados de solo, clima e planta (SANDHU; IRMAK. 2019).

Na estratégia de desenvolvimento de modelos mais simples e menos demandantes de dados de entrada, o AquaCrop (STEDUTO et al., 2009; RAES et al.,

2009) tem sido bastante utilizado. Esse modelo foi desenvolvido, a princípio, para estimar a produtividade, a necessidade de água e a produtividade de uso da água de uma cultura em condições limitantes de água (RAES et al., 2009). Ele fundamenta-se nos conceitos apresentados por Doorenbos e Kassam. (1979) que relaciona a resposta do rendimento das culturas à quantidade de água aplicada. Além do rendimento da cultura, o modelo também simula o conteúdo de água no solo (MKHABELA; BULLOCK, 2012; ABDALHI et al., 2019; BABEL et al., 2019). Os dados de entrada do modelo podem ser obtidos de forma simples (VANUYTRECHT et al., 2014; STEDUTO et al., 2009; RAES et al., 2009) o que facilita a sua aplicação, principalmente em regiões com carência de dados, como é o caso do Cerrado brasileiro.

O AquaCrop foi aplicado em várias regiões do mundo, sob diversas condições climáticas e agronômicas, para identificar a resposta das culturas ao estresse hídrico (KHOSHRAVESH et al., 2013; ARAYA et al., 2010; TODOROVIC et al., 2009), melhorar o manejo da irrigação (GARCÍA-VILA; FERERES, 2012; HENG et al., 2009), desenvolver cronogramas de irrigação por déficit (PAREDES et al., 2014; ANDARZIAN et al., 2011), avaliar o potencial aumento da produção através de manejo de campo (MHIZHA et al., 2014; SHRESTHA et al., 2013), avaliar o impacto das mudanças climáticas na produção agrícola (VANUYTRECHT et al., 2014; ABEDINPOUR et al., 2014) e avaliar o efeito da salinidade da água na produção agrícola (KUMAR et al., 2014).

Apesar de o modelo ter sido aplicado em várias regiões do mundo, muito pouco foi feito para a região do Cerrado brasileiro e menos ainda para as novas variedades de culturas que são lançadas anualmente no mercado. Além disso, os autores deste trabalho desconhecem estudos que avaliaram o modelo AquaCrop para estimativa do rendimento considerando o déficit hídrico aplicado por estádios de desenvolvimento da cultura.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar o desempenho do modelo AquaCrop para uma nova variedade de soja (BRS 7581RR) submetida a déficits hídricos aplicados em estádios de desenvolvimento da cultura específicos.

2.2.2 Material e métodos

2.2.2.1 Área de estudo

Os experimentos foram conduzidos de maio a agosto e de outubro a dezembro de 2019 com a cultura da soja cultivar BRS 7581RR (tipo indeterminado). Os experimentos foram instalados na Unidade de Referência em Manejo de Água (URMA) do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Embrapa Cerrados), localizada na região do Planalto Central do Bioma Cerrado (15°35'55,1"S, 47°42'27,4"W).

O clima da região é classificado como Aw (KÖPPEN, 1948), com temperatura média do ar igual a 22°C e precipitação pluvial de 1.500 mm ano⁻¹, sendo concentrada entre os meses de outubro a março (MALAQUIAS et al., 2010). O solo da área é classificado como Latossolo vermelho, contendo 58% de argila. O solo possui valores médios de densidade global, ponto de murcha permanente e capacidade de campo nas camadas 0-20 cm e 20-40 cm iguais a 1,09 g cm⁻³, 0,23 cm³cm⁻³ e 0,35 cm³cm⁻³ respectivamente.

Os dados meteorológicos necessários para execução do trabalho foram obtidos de uma estação climatológica localizada a aproximadamente 2 km do experimento.

A irrigação foi realizada por meio de um sistema de irrigação por gotejamento enterrado. O sistema consistia de mangueira gotejadora lateral, enterrada a 28 cm, com espaçamento de 0,9 m entre linhas e 0,4 m entre emissores, com pressão inicial dos emissores de 20 mca e vazão de 2 L h⁻¹.

2.2.2.2 Manejo da cultura

As sementes da cultura foram semeadas com espaçamento de 0,5 m entre linhas e 18 plantas por metro linear, visando atingir a densidade de 360.000 plantas por hectare. A adubação foi feita no sulco de semeadura nas seguintes quantidades: 22,5 kg de N; 112,5 kg de P₂O₅ e 112,5 kg de K₂O por hectare, com base na análise química do solo e seguindo recomendações de Sousa e Lobato (2004). A semeadura do experimento 1 ocorreu em 06/05/2019 e a colheita em 09/08/2019. O segundo experimento (experimento 2), utilizado para a validação do modelo, foi semeado em 09/09/2019 e colhido em 25/12/2019.

2.2.2.3 Delineamento experimental

Os experimentos foram montados no delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições (4 m x 2 m) em cada um dos cinco tratamentos (9 m x 20 m), totalizando vinte parcelas experimentais.

No tratamento controle (SE), não foi aplicado déficit hídrico, ou seja, a irrigação foi manejada de forma a suprir toda a demanda hídrica da cultura, visando sempre elevar o solo a capacidade de campo, em todas os seus estádios de desenvolvimento. Nos demais experimentos, onde foram aplicados déficits hídricos, a irrigação foi totalmente suspensa em determinados estádios de desenvolvimento da cultura. A irrigação foi suspensa apenas durante o período de duração do estádio. Finalizado o estádio fenológico, o déficit hídrico foi interrompido e a irrigação retomada conforme o tratamento controle. Para fins de avaliação do déficit hídrico, os seguintes estádios fenológicos foram considerados: VC-V4 (TI); V5-R1 (TII); R1-R5 (TIII); e R5-R7 (TIV). Por exemplo, no tratamento TI, a irrigação foi completamente suspensa do início da fase fenológica VC ao início da fase V5, quando foi retomada. Para facilitar o entendimento, daqui por diante, tratamento com déficit hídrico significa tratamento em que a irrigação foi suspensa.

As fases fenológicas da cultura foram identificadas por meio de avaliação morfológica da planta no campo e pela medição da porcentagem de cobertura vegetal. Para a avaliação da cobertura vegetal, foram obtidas imagens fotográficas do início e final de cada estádio correspondente aos tratamentos, obtendo-se assim, 10 imagens no experimento 1 e 10 imagens no experimento 2, por meio de um smartphone posicionado a 60 cm de altura do dossel, de uma área delimitada por uma moldura de 1m² em cada parcela experimental. A imagem obtida foi ajustada a moldura e processada por meio do aplicativo mobile Canopeo (PATRIGNANI; OCHSNER, 2015).

2.2.2.4 Manejo da irrigação e medição da umidade do solo

A lâmina de irrigação aplicada foi calculada com base no valor da umidade atual do solo em cada tratamento, por meio da Equação 1.

$$LA = \frac{0,1 (\theta_{CC} - \theta_{atual})}{Ef} Ds Z \quad (1)$$

em que

- LA = lâmina de irrigação aplicada, mm
- θ_{CC} = umidade do solo na capacidade de campo, %;
- θ_{atual} = umidade atual do solo em cada tratamento, %;
- Ds = densidade global do solo, g cm⁻³;
- Z = profundidade do sistema radicular da cultura, cm;
- Ef = Eficiência do sistema de irrigação (Ef = 0,90).

A profundidade do sistema radicular da cultura foi avaliada semanalmente em cada tratamento. Para isto, retirava-se aleatoriamente três plantas na área de cada unidade experimental e media-se o comprimento máximo da raiz. A irrigação era aplicada quando a umidade do solo medida na zona radicular atingia 50% da água total disponível no solo em cada tratamento. A umidade do solo foi determinada por meio do método gravimétrico. Amostras de solo foram retiradas diariamente nas camadas de 0-20 e 20-40 cm em cada parcela experimental, pesadas e posteriormente levadas para serem secas em estufa à 105 °C por 24h. Após a secagem, as amostras de solo eram novamente pesadas. Após obtenção do peso úmido e seco do solo, obtinha-se a umidade atual do solo e procedia-se os cálculos da lâmina de irrigação a ser aplicada em cada tratamento.

2.2.2.5 Estimativa da evapotranspiração atual

A evapotranspiração atual da cultura (ET_a), em mm d⁻¹, foi calculada por meio da Equação 2 e 3.

$$ET_a = 10 [(\theta_{1i\ 0-20cm} - \theta_{2i-1\ 0-20cm}) D_i], \text{ para } Z_i \leq 20 \text{ cm} \quad (2)$$

$$ET_a = 10 [(\theta_{1i\ 0-20cm} - \theta_{2i-1\ 0-20cm}) D_i + (\theta_{1i\ 20-40cm} - \theta_{2i-1\ 20-40cm}) D_i], \text{ para } Z_i > 20 \text{ cm} \quad (3)$$

em que

θ_{1i} = umidade volumétrica no momento da primeira amostragem, m³ m⁻³;

θ_{2i} = umidade volumétrica no momento da segunda amostragem, m³ m⁻³

D_i = espessura da camada (20 cm).

2.2.2.6 Estimativa da biomassa e rendimento

Foram realizadas 4 avaliações de biomassa nos experimentos 1 (45, 55, 69 e 83 DAS) e 2 (57, 65, 81 e 100 DAS), retirando-se as plantas presentes em 0,5 m linear, na linha de plantio, nas quatro repetições. Após serem retiradas, a raiz, caule, folhas e vagens foram separadas e acondicionadas em sacos de papel e levadas para a estufa, onde ficaram secando por 36h a uma temperatura de 75°C e posteriormente pesadas. Para avaliação do rendimento de grãos, foi selecionada aleatoriamente uma área em cada uma das quatro repetições e coletadas todas as plantas existentes em 2 metros lineares. As vagens de cada planta foram debulhadas e os grãos foram acondicionados em sacos de papel devidamente identificados e encaminhados para o laboratório de

análises de sementes, onde foram pesados em balança analítica, e após a correção da umidade do grão para 13%, o rendimento foi determinado em cada tratamento.

2.2.2.7 Descrição e dados de entrada do modelo

O modelo AquaCrop simula o rendimento potencial em função da quantidade de água transpirada pela cultura sob diferentes regimes de disponibilidade hídrica.

Para realizar as simulações com o AquaCrop, são necessários dados de entrada de clima, característica da cultura, solo e descrição de práticas de manejo. O AquaCrop utiliza uma função normalizada de produtividade da água da cultura para a simulação de biomassa. A equação para a simulação da biomassa final proposta por Steduto et al. (2009) é dada pela Equação 4.

O cálculo do rendimento é realizado ajustando-se o índice de colheita (HI) em função do estresse hídrico ocorrido no início da formação do rendimento, florescimento e durante a formação do rendimento, dado pela Equação 5 (STEDUTO et al., 2009).

$$B = WP \sum T_r \quad (4)$$

$$Y = HI_o B \quad (5)$$

em que

- B = biomassa acima do solo, kg m⁻²
- WP = produtividade da água normalizada, kg m⁻²
- Tr = transpiração da cultura, mm.
- Y = produtividade, kg m⁻²
- HIo = índice de colheita de referência, %.

O modelo simula o desenvolvimento da cobertura vegetal (CC), com base no valor inicial de CC, no coeficiente de crescimento do dossel (CGC), no valor máximo de CC, no coeficiente de declínio do dossel (CDC), e no número de dias para a emergência e para a senescência/maturidade.

A curva de CC pode ser parametrizada usando valores de área foliar medidos em campo. Os valores de CC, a partir dos dados de índice de área foliar (IAF), foram calculados por meio da equação desenvolvida por Hsiao et al. (2009).

$$CC = 1,005 (1 - \exp(-0,6 IAF))^{1,2} \quad (6)$$

A área foliar foi avaliada aos 22, 32, 46, 56, 70 e 84 DAS no experimento 1 e aos 30, 57, 65, 81 e 100 DAS, no experimento 2. Para isto, quatro plantas, em cada

uma das quatro repetições, dos cinco tratamentos, eram retiradas e levadas ao laboratório onde a área foliar era medida por meio de um medidor de área foliar LI-3100c (Licor, Inc., Lincoln, NE, EUA).

Os dados meteorológicos necessários (temperatura e precipitação) para execução do modelo foram obtidos de uma estação climatológica localizada a aproximadamente 2 km do experimento. A evapotranspiração de referência (ET_0) foi calculada pela equação FAO-Penman Monteith (ALLEN et al., 1998). Para todos os tratamentos, foi utilizado um arquivo padrão da concentração média anual de CO_2 medida no Observatório Mauna Loa, no Havaí, fornecida pelo AquaCrop.

Os parâmetros iniciais do modelo, foram selecionados a partir de um arquivo padrão para soja apresentados por Raes et al. (2012). Para parâmetros não medidos durante o experimento, utilizou-se os valores padrões. Um arquivo de cultura (.CRO) foi criado após a calibração. Dados de irrigação dos tratamentos com déficit hídrico foram utilizados para determinar a resposta das culturas ao estresse hídrico. Estresse causado por salinidade e fertilidade do solo não foram considerados. A fenologia das culturas foi observada em dias corridos e posteriormente convertida em tempo térmico (GDD).

Foi gerado um único arquivo de solo (.SOL) que foi utilizado em cada experimento. A irrigação foi realizada por meio de um sistema de irrigação por gotejamento enterrado, não havendo, portanto, umedecimento da superfície do solo. Foram criados cinco arquivos de irrigação separados (.IRR) para cada tratamento. Para o arquivo de manejo de campo (.MAN), a fertilidade do solo não era limitante, sem cobertura morta e sem práticas para impedir o escoamento superficial.

2.2.2.8 Calibração e validação do modelo

O modelo foi calibrado com os dados do tratamento SE do experimento 1. A validação do modelo foi realizada utilizando-se os dados observados de rendimento, biomassa e evapotranspiração atual de todos os tratamentos do experimento 2. A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros utilizados como padrão (RAES et al., 2012), bem como os valores calibrados dos parâmetros no experimento 1.

Tabela 2.2.1. Parâmetros de soja calibrados através do experimento 1 e padrão do modelo AquaCrop usado neste estudo

| Parâmetro | Calibrado | Padrão |
|---|-----------|--------|
| Temperatura basal (°C) | 10 | 5 |
| Máxima temperatura (°C) | 30 | 30 |
| Cobertura vegetal no estágio de plântula (cm ² planta ⁻¹) | 5 | 5 |
| Profundidade máxima de enraizamento (m) | 0,4 | 2 |
| Coefficiente de cultura para transpiração (Kcb) | 0,9 | 1,1 |
| Produtividade de água normalizada para a cultura (g m ⁻²) | 17 | 15 |
| Limite de depleção da água no solo para expansão do dossel - limite superior | 0,20 | 0,15 |
| Limite de depleção da água no solo para expansão do dossel - limite inferior | 0,55 | 0,65 |
| Fator de forma para o coeficiente de estresse hídrico para a expansão do dossel | 3 | 3 |
| Limite de depleção da água no solo para controle estomático - limite superior | 0,60 | 0,60 |
| Fator de forma para o coeficiente de estresse hídrico para o controle estomático | 3 | 3 |
| Limite de depleção da água no solo para senescência do dossel - limite superior | 0,85 | 0,7 |
| Fator de forma para o coeficiente de estresse hídrico para a senescência do dossel | 3 | 3 |
| Percentual volumétrico no ponto anaerobiótico (com referência para a saturação) (%) | 5 | 5 |
| Coefficiente de declínio do dossel (% GDA ⁻¹) | 0,709 | 0,15 |
| Índice de colheita de referência (%) | 45 | 40 |
| Estágios de crescimento das culturas (GDA) | | |
| Tempo desde a semeadura até a emergência | 80 | 200 |
| Tempo desde a semeadura até a cobertura máxima do dossel | 777 | 1522 |
| Tempo da semeadura à senescência | 853 | 2200 |
| Tempo desde a semeadura até a maturidade | 1009 | 2700 |
| Tempo desde a semeadura até a floração | 536 | 1500 |
| Duração do estágio de floração | 127 | 600 |

GDA = Graus dias acumulados

Os valores simulados foram comparados com os valores observados dos experimentos e as estatísticas de desempenho da validação do modelo foram analisadas. Para avaliar o desempenho do modelo utilizou-se como indicadores estatísticos a raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro médio (MBE), eficiência do modelo de Nash-Sutcliffe (EF) e coeficiente de determinação (r^2). Os indicadores foram calculados pelas equações 7, 8, 9, 10.

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

$$MBE = \bar{P}_i - \bar{O}_i \quad (8)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

$$r^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)(O_i - \bar{O}_i))^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

em que

O_i = valores observados no experimento em campo de ordem i ;

\bar{O} = média dos valores observados;

P_i = valores simulados pelo modelo de ordem i ;

\bar{P}_i = média dos valores simulados;

n = número de observações.

O RMSE varia de 0 a $+\infty$, indicando desempenho ideal e ruim, respectivamente. Um valor de 15% é considerado "bom" e 20% é "satisfatório" para modelos agrícolas (ADEBOYE et al., 2019). O erro médio de viés (MBE), indica a porcentagem do desvio médio dos valores previstos em relação aos medidos (ZACHARIAS et al., 1996). O EF, com valores variando de $-\infty$ a 1, indica a proximidade do conjunto de dados observados versus simulados da linha 1:1. O desempenho de modelos com valores entre 0 e 1 são geralmente considerados aceitáveis. Valores de EF menores que 0 indicam desempenho inaceitável (MORIASI et al., 2007). Para estudos com simulação de desenvolvimento de culturas, recomenda-se valores de $r^2 > 0,80$ (MA et al., 2011).

2.2.3 Resultados

2.2.3.1 Avaliação dos dados climáticos observados

Na Figura 2.2.1 apresenta-se uma síntese dos dados climáticos observados durante a duração dos experimentos 1 e 2.

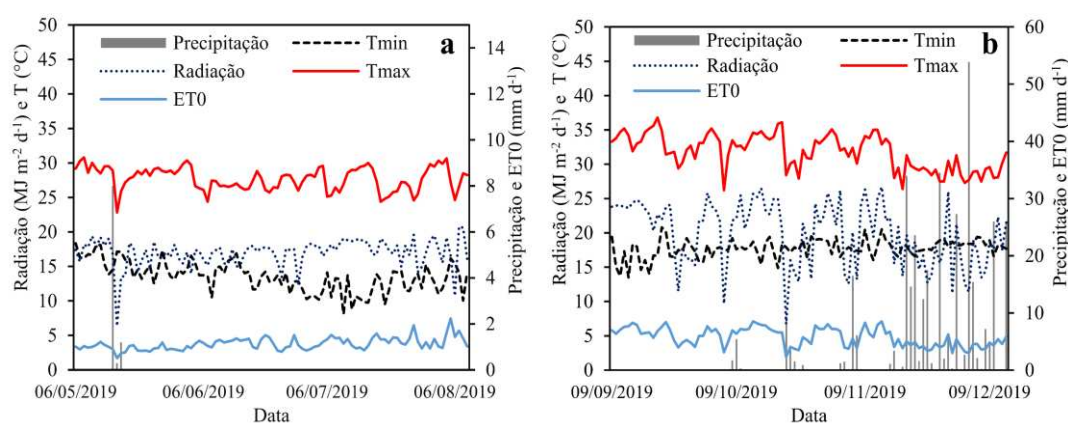


Figura 2.2.1. Temperaturas máxima (Tmax) e mínima (Tmin) do ar, radiação solar, precipitação e evapotranspiração de referência (ET0) ocorridas nos experimentos 1 (a) e 2 (b) durante o cultivo de soja.

Durante o experimento 1, foram observados três eventos chuvosos, ocorridos logo após o plantio da cultura, antes da emergência da planta, totalizando 9,5 mm. No experimento 2, foram observados 47 eventos chuvosos, com o primeiro evento ocorrido 10 dias após a emergência da cultura, e maiores frequências de precipitação a partir dos 71 dias após o plantio, totalizando 417,5 mm. No experimento 1, a ET_0 variou de 1,7 a 7,4 $mm\ d^{-1}$, atingindo seu valor máximo no mês de agosto. No experimento 2, os valores de ET_0 variaram de 1,9 a 7,1 $mm\ d^{-1}$. A temperatura média do ar variou de 16,9 a 23,2 °C no experimento 1 e de 20,4 a 28,1 °C no experimento 2. A radiação solar variou de 6,4 a 20,8 $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ no experimento 1, sendo o maior valor observado no mês de agosto; já no experimento 2, a radiação variou de 6,7 a 27,0 $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$, com maior valor encontrado no mês de dezembro. A média de horas de luz durante o experimento 2 foi de 9 h d^{-1} e no experimento 1 foi de 7 h d^{-1} .

2.2.3.2 Cobertura vegetal

Os valores de cobertura vegetal obtidos após a calibração do modelo (experimento 1) e após a validação (experimento 2), bem como os indicadores de desempenho do modelo para os diferentes tratamentos de déficit hídrico, em diferentes estádios de crescimento da soja, estão apresentados na Figura 2.2.2.

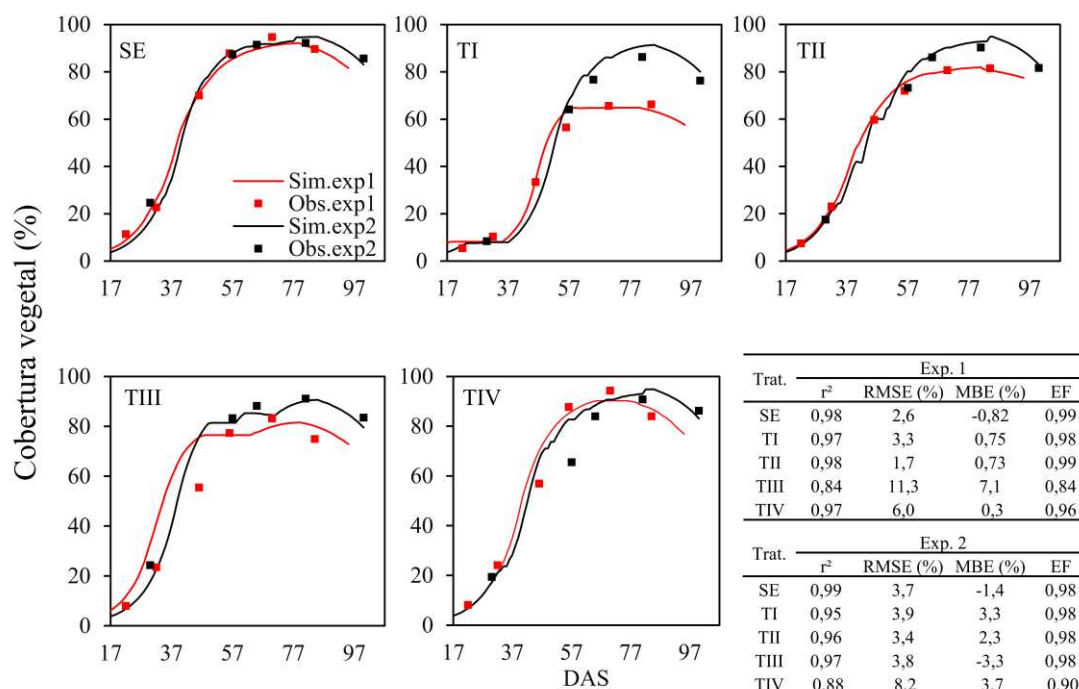


Figura 2.2.2. Cobertura vegetal da soja observada e simulada e indicadores de desempenho do modelo calibrado para cada tratamento do experimento 1 e 2 (validação), em função dos dias após a semeadura (DAS). SE = tratamento controle (sem déficit hídrico); TI = déficit hídrico aplicado no estágio VC-V4; TII = déficit

hídrico aplicado no estádio V5-R1; TIII = déficit hídrico aplicado no estádio R1-R5; TIV = déficit hídrico aplicado no estádio R5-R7; Sim = simulado; Obs = observado; Exp = experimento.

Em geral, os resultados da calibração e validação indicaram boa concordância entre os dados simulados e observados de cobertura vegetal em todos os tratamentos, com elevados valores de r^2 ($> 0,84$), EF ($> 0,84$), baixos valores de RMSE (variando de 1,7 a 11,3%) e MBE (variando de -3,3 a 7,1%). A menor precisão na estimativa da cobertura vegetal foi observada nos tratamentos TIII e TIV, tanto no experimento de calibração, quanto no de validação. Após calibrado, o modelo subestimou a máxima cobertura vegetal (ocorrida aos 70 DAS) em 3,8%, 1,2%, 0,4%, 4% e 4,3% nos tratamentos SE, TI, TII, TIII e TIV, respectivamente. Na validação, o modelo superestimou a máxima cobertura vegetal (ocorrida aos 80 DAS) em 2,6%, 5,3%, 2,8% e 2,4% nos tratamentos SE, TI, TII e TVI, e subestimou em 0,98% no tratamento TIII.

2.2.3.3 Conteúdo de água no solo

Os valores de conteúdo de água no solo obtidos no experimento 1 e no experimento 2 (validação), bem como os indicadores de desempenho do modelo para os diferentes tratamentos, estão apresentados na Figura 2.2.3.

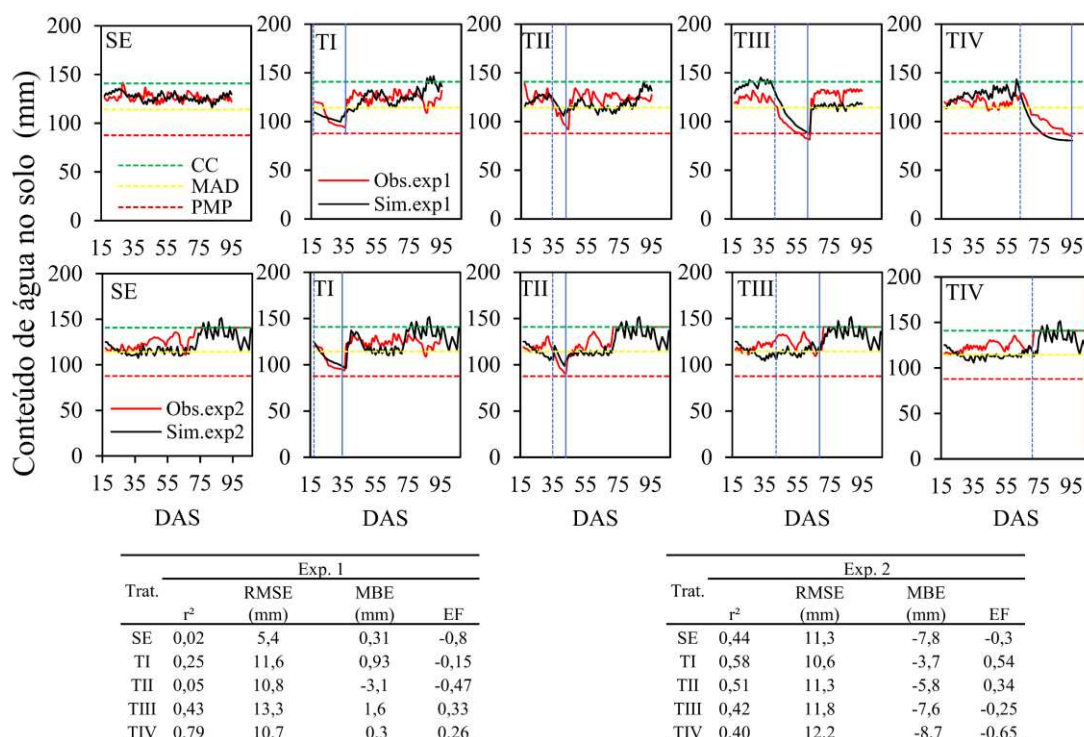


Figura 2.2.3. Valores, observados e simulados, de conteúdo de água diário no perfil de solo de 0-0,4m e indicadores de desempenho do modelo calibrado para cada tratamento do experimento 1 e 2 (validação), em função dos dias após a semeadura (DAS). SE = tratamento controle (sem déficit hídrico); TI = déficit hídrico aplicado no estádio VC-V4; TII = déficit hídrico aplicado no estádio V5-R1; TIII = déficit hídrico

aplicado no estágio R1-R5; TIV = déficit hídrico aplicado no estágio R5-R7; CC = capacidade de campo; MAD = déficit de manejo; PMP = ponto de murcha permanente; Sim = simulado; Obs = observado; Exp = experimento. As linhas verticais azuis representam o início (tracejada) e o fim (contínua) da aplicação do déficit hídrico em função do estágio de desenvolvimento da cultura.

Os indicadores de desempenho mostraram que a simulação do conteúdo de água no solo não foi satisfatória. No experimento 1, o valor de r^2 variou de 0,02 a 0,79, o RMSE variou de 5,4 mm a 13,3 mm, que corresponde a 4,2% e 11,3% do valor médio do conteúdo de água no solo dos tratamentos SE e TIII, respectivamente, o MBE variou de -3,1 mm a 1,6 mm, o EF variou de -0,8 a 0,26. No experimento 2, o valor de r^2 variou de 0,40 a 0,58, o RMSE variou de 10,6 mm a 12,2 mm, que corresponde a 8,4% e 9,4% do valor médio do conteúdo de água no solo dos tratamentos TI e TIV, respectivamente, o MBE variou de -3,7 mm a -8,7 mm, e o EF variou de -0,65 a 0,54.

2.2.3.4 Evapotranspiração atual

Os valores de ETa após calibração (experimento 1) e validação (experimento 2) do modelo, bem como os indicadores de desempenho do modelo para os diferentes tratamentos de déficit hídrico, em diferentes estágios de crescimento da soja, estão apresentados na Figura 2.2.4.

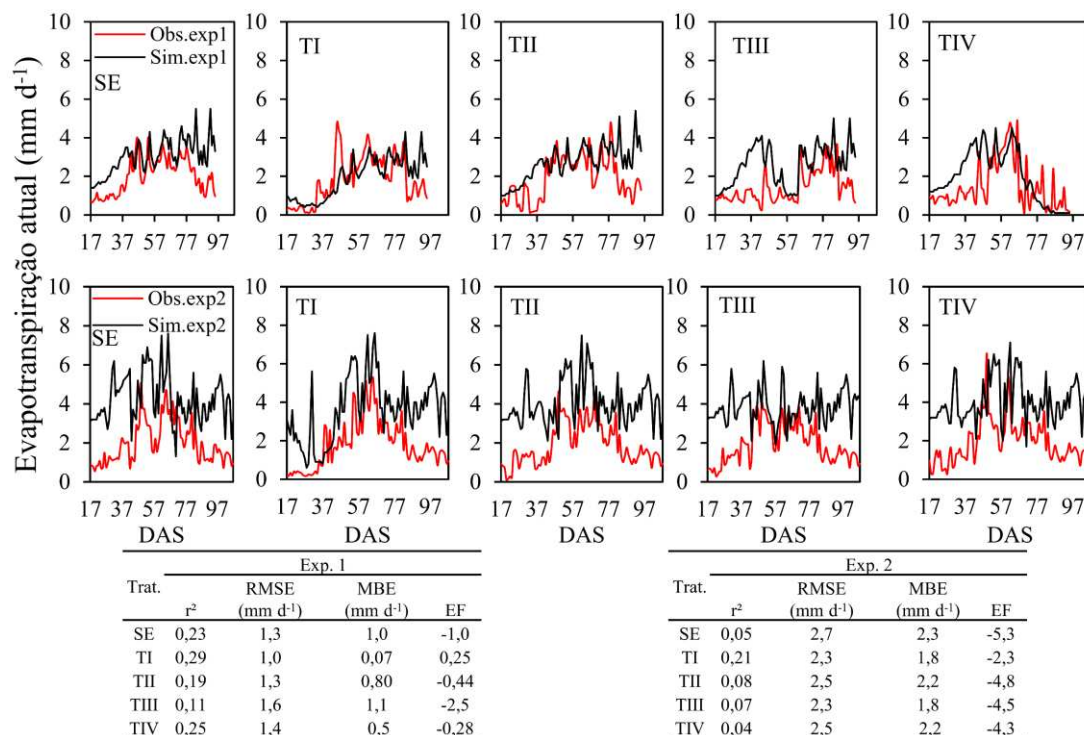


Figura 2.2.4. Valores, observados e simulados, de evapotranspiração atual diária e indicadores de desempenho do modelo calibrado para cada tratamento do experimento 1 e 2 (validação), em função dos dias após a semeadura (DAS). SE = tratamento

controle (sem déficit hídrico); TI = déficit hídrico aplicado no estágio VC-V4; TII = déficit hídrico aplicado no estágio V5-R1; TIII = déficit hídrico aplicado no estágio R1-R5; TIV = déficit hídrico aplicado no estágio R5-R7; CC = capacidade de campo; MAD = déficit de manejo; PMP = ponto de murcha permanente; Sim = simulado; Obs = observado; Exp = experimento.

As evapotranspirações médias diárias observadas e simuladas em cada estágio de desenvolvimento do tratamento SE, do experimento 1, foram iguais a 0,9 mm d⁻¹ e 1,9 mm d⁻¹ (VC-V4), 1,2 mm d⁻¹ e 3,2 mm d⁻¹ (V5-R1), 2,7 mm d⁻¹ e 3,2 mm d⁻¹ (R1-R5), 2,5 mm d⁻¹ e 3,5 mm d⁻¹ (R5-R7), respectivamente. A evapotranspiração média diária observada e simulada durante o período de aplicação do déficit hídrico nos tratamentos TI, TII, TIII e TIV, do experimento 1, foram iguais a 0,30 mm d⁻¹ e 0,61 mm d⁻¹, 0,8 mm d⁻¹ e 2,7 mm d⁻¹, 1,0 mm d⁻¹ e 2,7 mm d⁻¹, 1,3 mm d⁻¹ e 0,78 mm d⁻¹, respectivamente.

No experimento 2, as evapotranspirações médias diárias observadas e simuladas em cada estágio de desenvolvimento da cultura do tratamento SE foram iguais a 1,0 mm d⁻¹ e 3,9 mm d⁻¹ (VC-V4), 1,8 mm d⁻¹ e 4,9 mm d⁻¹ (V5-R1), 3,0 mm d⁻¹ e 4,8 mm d⁻¹ (R1-R5), 2,0 mm d⁻¹ e 3,9 mm d⁻¹ (R5-R7). Os tratamentos TI, TII, TIII e TIV apresentaram valores de ETa média diária observadas e simuladas, no período de aplicação dos déficits hídricos, iguais a 0,30 mm d⁻¹ e 1,9 mm d⁻¹, 1,0 mm d⁻¹ e 3,3 mm d⁻¹, 3,0 mm d⁻¹ e 3,3 mm d⁻¹, 1,8 mm d⁻¹ e 3,7 mm d⁻¹, respectivamente.

O desempenho do modelo na simulação da ETa da cultura da soja plantada nos experimentos 1 e 2 não foi satisfatório. No experimento 1, o valor de r² variou de 0,11 a 0,29, o RMSE variou de 1,0 a 1,6 mm d⁻¹, que corresponde a 54% e 112% do valor médio de ETa dos tratamentos TI e TIII, o MBE variou de 0,07 mm d⁻¹ a 1,1 mm d⁻¹, o EF variou de -2,5 a 0,25. No experimento 2, o valor de r² variou de 0,04 a 0,21, o RMSE variou de 2,3 mm d⁻¹ a 2,7 mm d⁻¹, que corresponde a 128% e 137% do valor médio de ETa dos tratamentos TI e SE, respectivamente, o MBE variou de 1,8 mm d⁻¹ a 2,3 mm d⁻¹, e o EF variou de -5,3 a -2,3.

2.2.3.5 Biomassa no ciclo

Os valores de biomassa avaliados no experimento 1 e experimento 2, bem como os indicadores de desempenho do modelo para os diferentes tratamentos de déficit hídrico, em diferentes estágios de crescimento da soja, estão apresentados na Figura 2.2.5.

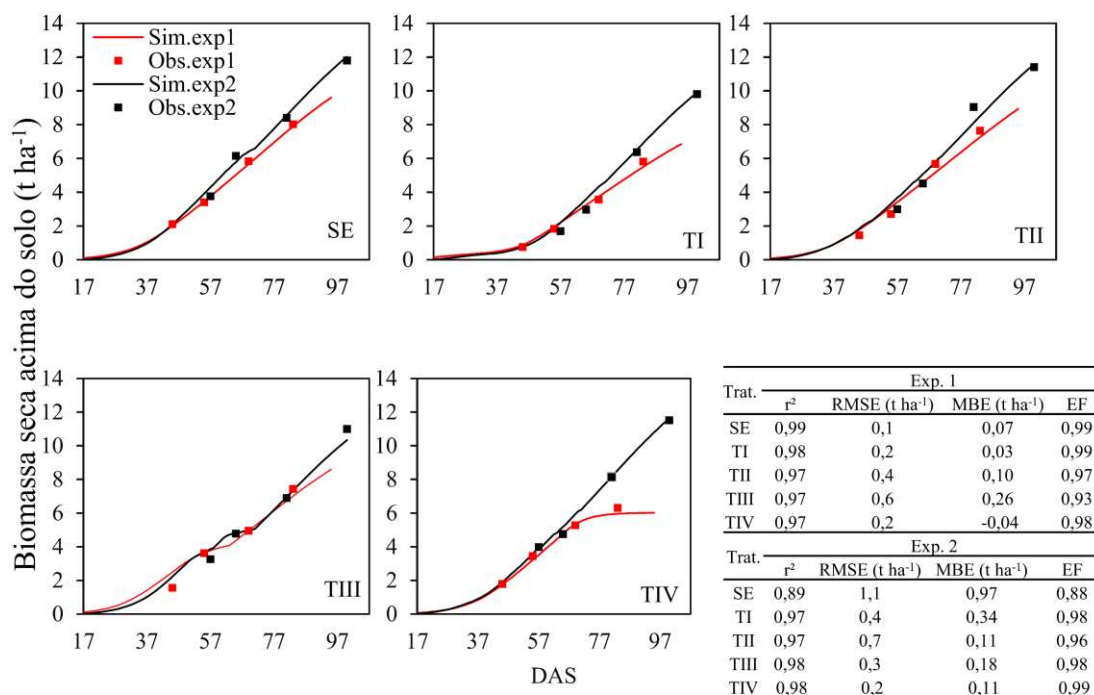


Figura 2.2.5. Biomassa seca acima do solo da soja observada e simulada e indicadores de desempenho do modelo calibrado para cada tratamento do experimento 1 e 2 (validação), em função dos dias após a semeadura (DAS). SE = tratamento controle (sem déficit hídrico); TI = déficit hídrico aplicado no estágio VC-V4; TII = déficit hídrico aplicado no estágio V5-R1; TIII = déficit hídrico aplicado no estágio R1-R5; TIV = déficit hídrico aplicado no estágio R5-R7; Sim = simulado; Obs = observado; Exp = experimento.

De maneira geral, o modelo apresentou bom desempenho na estimativa da biomassa seca acima do solo para todos os tratamentos nos dois experimentos. No experimento 1, o valor de r^2 variou de 0,97 a 0,99, o RMSE variou de 0,1 t ha⁻¹ a 0,6 t ha⁻¹, que corresponde a 2% e 13,7% do valor médio de biomassa dos tratamentos SE e TIII, o MBE variou de -0,04 t ha⁻¹ a 0,26 t ha⁻¹, o EF variou de 0,93 a 0,99. No experimento 2, o valor de r^2 variou de 0,89 a 0,98, o RMSE variou de 0,2 t ha⁻¹ a 1,1 t ha⁻¹, que corresponde a 2,8% e 16,5% do valor médio de biomassa dos tratamentos TIV e SE, respectivamente, o MBE variou de 0,11 t ha⁻¹ a 0,97 t ha⁻¹, o EF variou de 0,88 a 0,99.

2.2.3.6 Rendimento

Os valores de rendimento obtidos após a calibração do modelo (experimento 1) e após a validação (experimento 2), para os diferentes tratamentos, estão apresentados na Tabela 2.2.2.

Tabela 2.2.2. Valores de rendimento observados e simulados para cada tratamento dos experimentos 1 e 2.

| | Tratamento | Rendimento (t ha ⁻¹) | |
|---------------|------------|----------------------------------|----------|
| | | Observado | Simulado |
| Experimento 1 | SE | 3,2 | 3,2 |
| | TI | 2,3 | 2,2 |
| | TII | 2,8 | 2,8 |
| | TIII | 2,2 | 2,3 |
| | TIV | 2,0 | 2,0 |
| Experimento 2 | SE | 5,6 | 5,5 |
| | TI | 4,0 | 4,0 |
| | TII | 4,9 | 4,9 |
| | TIII | 4,9 | 5,0 |
| | TIV | 5,2 | 5,2 |

SE = tratamento controle (sem déficit hídrico); TI = déficit hídrico aplicado no estádio VC-V4; TII = déficit hídrico aplicado no estádio V5-R1; TIII = déficit hídrico aplicado no estádio R1-R5; TIV = déficit hídrico aplicado no estádio R5-R7.

A correlação entre o rendimento observado e simulado para cada tratamento dos experimentos 1 e 2 está apresentada na Figura 2.2.6.

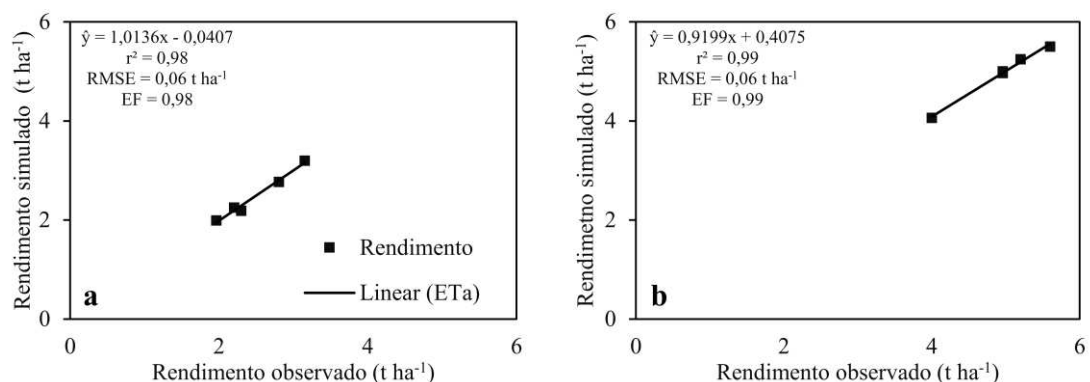


Figura 2.2.6. Correlação entre os dados observados e simulados de rendimento do modelo calibrado para cada tratamento do experimento 1 (a) e 2 (b).

O modelo simulou com bom desempenho o rendimento da cultura de soja para todos os tratamentos nos dois experimentos. No experimento 1, o valor de r^2 foi igual a 0,98, $RMSE = 0,06 \text{ t ha}^{-1}$, e EF igual a 0,98. No experimento 2, observou-se r^2 , $RMSE$ e EF iguais a 0,99, $0,06 \text{ t ha}^{-1}$ e 0,99, respectivamente.

2.2.4 Discussão

Os resultados apresentados de cobertura vegetal, indicam que o modelo tende a subestimar a CC quando não há a ocorrência de chuva, e superestimar quando ocorre chuva durante o ciclo da cultura. De maneira geral, o modelo, após calibrado, apresentou bom desempenho na estimativa da cobertura vegetal, tomando por base os elevados valores de EF ($>0,8$) e baixos valores de RMSE ($<11,3\%$). Uma boa calibração desse parâmetro é essencial para o adequado desempenho do modelo na estimativa da biomassa e do rendimento da cultura, uma vez que ele interfere diretamente na taxa de transpiração e conseqüentemente o acúmulo de biomassa (FARAHANI et al., 2009). Paredes et al. (2014) avaliando o modelo para as condições da China também observaram tendências do modelo a super ou subestimar a CC da soja em condições de disponibilidade hídrica diferentes.

O modelo, após calibrado, apresentou desempenho ruim na estimativa do conteúdo de água no solo, tomando por base os valores negativos de EF, que foram observados nos dois experimentos. Os valores de coeficiente de determinação foram relativamente baixos para a maioria dos tratamentos avaliados. Estes resultados indicam que a variabilidade no conteúdo de água no solo não foi bem representada pelo modelo (ADEBOYE et al., 2019). Por outro lado, observou-se que o modelo simulou adequadamente a dinâmica de água no solo, representando de maneira satisfatória o comportamento da umidade, principalmente nas fases de déficit hídrico. Similar a este estudo, Farahani et al. (2009), Hussein et al. (2011) e Mkhabela e Bullock (2012), relataram que o AquaCrop apresentou tendência a superestimar o teor total de água no solo, principalmente nos tratamentos com déficit de irrigação. Zeleke et al. (2011) avaliando o AquaCrop para a canola observaram que o modelo representou adequadamente a dinâmica de água no solo, com tendência a superestimar os valores observados. Outros trabalhos apresentaram resultados semelhantes ao obtido no presente estudo (PEREIRA et al., 2015; PAREDES et al., 2014; IQBAL et al., 2014).

Nos experimentos 1 e 2, os valores positivos de MBE indicaram que a ETa foi superestimada pelo modelo (Figura 2.2.4). Observou-se valores elevados de RMSE tanto no experimento 1 ($1,6 \text{ mm d}^{-1}$), como no 2 ($2,7 \text{ mm d}^{-1}$), e valores de r^2 baixos iguais a 0,11 no experimento 1, e 0,04, no experimento 2, e baixos valores de EF, indicando um baixo desempenho do modelo nas estimativas da ETa diária. Uma das causas do baixo desempenho na simulação da ETa pelo modelo, é o baixo desempenho

na simulação do conteúdo de água no solo (SANDHU; IRMAK, 2019). A simulação precisa do conteúdo de água no solo é uma indicação de boa estimativa de ETa no componente de balanço hídrico no solo do modelo AquaCrop (GEERTS et al., 2009). Outro ponto a ser destacado é o fato de o AquaCrop calcular a ETa separando a evaporação direta de água do solo (Es) da transpiração (Tr), com base na cobertura vegetal (VANUYTRECHT et al., 2014). No presente trabalho, a irrigação foi realizada por meio de um sistema de irrigação por gotejamento enterrado, onde o valor da Es tende a zero. É necessário estudos adicionais para avaliar o desempenho do modelo nesse tipo de sistema de irrigação, principalmente no que diz respeito à estimativa da ETa.

No experimento 1, os erros absolutos na estimativa da ETa total do ciclo variaram de +5,9 a +91,2 mm. No experimento 2, os erros variaram de +159,3 a +208,3 mm. No experimento 1, esse erro, considerando uma área irrigada de 100 ha, equivaleria a um volume de água igual 91200 m³. Já no experimento 2, o maior erro absoluto foi observado no tratamento SE, com uma diferença entre o observado e simulado de 208300 m³ para uma área cultivada de 100 ha. A magnitude dos números indica a importância de se ter estimativas adequadas da ETa.

O modelo apresentou bom desempenho na estimativa da biomassa em todos os tratamentos (Figura 5), o que está relacionado à boa estimativa da cobertura vegetal (Figura 2). O bom desempenho na simulação da biomassa pelo modelo AquaCrop foi também observado por outros autores (KHOSHRAVESH et al., 2012; PAREDES et al., 2015; ADEBOYE et al., 2019).

Apesar do desempenho ruim do modelo na estimativa da ETa, observou-se um bom desempenho na estimativa da biomassa. Isso pode estar relacionado a calibração da produtividade da água normalizada (WP), já que para o cálculo da biomassa o AquaCrop utiliza a WP como parâmetro.

O modelo apresentou bom desempenho nas estimativas do rendimento da cultura da soja nos dois experimentos (Tabela 1). Apesar de ter ocorrido precipitação durante o período de validação do modelo, ainda assim, o modelo foi capaz de estimar adequadamente (erro = 0,2 t ha⁻¹) o rendimento final em cada tratamento. As diferenças observadas nos rendimentos da soja em um mesmo tratamento nos dois experimentos, deve-se as variações nas datas de plantio e nas condições climáticas. Adeboye et al. (2017) também observaram bom desempenho do AquaCrop na simulação do rendimento da soja em condições de déficit hídrico. Paredes et al. (2015) observaram

boa estimativa do rendimento da soja pelo AquaCrop e atribuíram esse desempenho do modelo a calibração adequada dos parâmetros.

2.2.5 Conclusões

O modelo AquaCrop apresentou bom desempenho na estimativa da evolução da cobertura vegetal da soja submetida a déficits hídricos aplicados em diferentes estádios de crescimento.

O modelo superestimou o conteúdo de água no solo, porém, foi capaz de simular de maneira adequada a dinâmica de água no solo.

A ETa não foi simulada satisfatoriamente pelo modelo em todos os tratamentos estudados, sendo observada uma baixa correlação entre os valores observados e simulados e baixa eficiência na estimativa.

O modelo apresentou bom desempenho na estimativa da biomassa e do rendimento da cultura da soja.

2.2.6 Referências bibliográficas

ABDALHI, M. A. M.; JIA, Z.; LUO, W.; TANG, S.; ALI, O. O.; CHENG, J. FAO AquaCrop Model Performance: in Green Canopy Cover, Soil Moisture and Production of Maize at Middle and Lower Reaches Plain of Yangtze River of China. **Russian Agricultural Sciences**, v. 45, n. 2, p. 186-193, 2019.

GEERTS, A.; RAES, D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 96, n. 9, p. 1275-1284, set. 2009.

ABEDINPOUR, M.; SARANGI, A.; RAJPUT, T. B. S.; SINGH, M. Prediction of maize yield under future water availability scenarios using the AquaCrop model. **The Journal of Agricultural Science**, v. 152, n. 4, p. 558-574, 2014.

ADEBOYE, O. B.; SCHULTZ, B.; ADEKALU, K. O.; PRASAD, K. Modelling of response of the growth and yield of soybean to full and deficit irrigation by using Aquacrop. **Irrigation and drainage**, v. 66, n. 2, p. 192-205, 2017.

ADEBOYE, O. B.; SCHULTZ, B.; ADEKALU, K. O.; PRASAD, K. C. Performance evaluation of AquaCrop in simulating soil water storage, yield, and water productivity of rainfed soybeans (*Glycine max L. merr*) in Ile-Ife, Nigeria. **Agricultural water management**, v. 213, p. 1130-1146, 2019.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998.

ALLEN, E.; VALDES, C. **Brazil's Corn Industry and the Effect on the Seasonal Pattern of U.S. Corn Exports**. AES-93, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, June 2016.

ALTHOFF D.; RODRIGUES LN. The expansion of center-pivot irrigation in the Cerrado biome. **IRRIGA**, v. 1, n. 1, p. 56-61, 2019.

ANDARZIAN, .; BANNAYAN, M.; STEDUTO, P.; MAZRAEH, H.; BARATI, M. E.; BARATI, M. A.; RAHNAMA, A. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. **Agricultural Water Management**, v. 100, n. 1, p. 1-8, 2011.

ARAYA, A.; HABTU, S.; HADGU, K. M.; KEBEDE, A.; DEJENE, T. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 11, p. 1838-1846, 2010.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. Planaltina, Embrapa Cerrados. 416p.

BOOGAARD, H. L.; VAN DIEPEN, C. A.; ROTTER, R. P.; CABRERA, J. M. C. A.; VAN LAAR, H. H. **WOFOST 7.1; user's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5** (No. 52). SC-DLO. 1998.

BRASIL. **Análise territorial para o desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil**. Brasília: MI, 2014, 217 p.

BRISSON, N.; MARY, B.; RIPOCHE, D.; JEUFFROY, M. H.; RUGET, F.; NICOULLAUD, B.; ...RICHARD, G. **STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn**. 1998.

CAVERO, J.; FARRE, I.; DEBAEKE, P.; FACI, J. M. **Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models**. 2000.

MA, L.; AHUJA, L.R.; SASEENDRAN, S.A.; MALONE, R.W.; GREEN, T.R.; NOLAN, B.T.; BARTLING, P.N.S.; FLERCHINGER, G.N.; BOOTE, K.J.; HOOGENBOOM, G. A protocol for parameterization and calibration of RZWQM2 in field research. In: AHUJA, L.R., MA, L. (Eds.), **Methods of Introducing System Models into Agricultural Research**. ASA, CSSA and SSSA, Madsion, WI, pp. 1-64, 2011.

DA SILVA E.H.; GONÇALVES, A.O.; PEREIRA, R.A.; JÚNIOR I.M.F.; SOBENKO, L.R.; MARIN, F.R. Soybean irrigation requirements and canopy-atmosphere coupling in Southern Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 218, p. 1-7, 2019.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. **Yield Response to Water**. Irrigation and Drainage Paper 33. Rome: FAO, 1998. 257 p.

FAPDA (FOOD AND AGRICULTURE POLICY DECISION ANALYSIS). 2014 **Brazil country fact sheet on food and agriculture policy trends**. [s.l.], FAPDA, 2014. 5 p.

FARAHANI, H. J.; IZZI, G.; OWEIS, T. Y. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. **Agronomy journal**, v. 101, n. 3, p. 469-476, 2009.

GARCÍA-VILA, M.; FERERES, E. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. **European Journal of Agronomy**, v. 36, n. 1, p. 21-31, 2012.

HENG, L. K.; HSIAO, T.; EVETT, S.; HOWELL, T.; STEDUTO, P. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 488-498, 2009.

HSIAO, T. C.; HENG, L.; STEDUTO, P.; ROJAS-LARA, B.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 448-459, 2009.

HUSSEIN, F.; JANAT, M.; YAKOUB, A. Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model. **Spanish Journal of Agricultural Research**, n. 4, p. 1319-1330, 2011.

IQBAL, M. A.; SHEN, Y.; STRICEVIC, R.; PEI, H.; SUN, H.; AMIRI, E.; PENAS, A.; DEL RIO, S. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. **Agricultural Water Management**, v. 135, p. 61-72, 2014.

JONES, J. W., HOOGENBOOM, G., PORTER, C. H., BOOTE, K. J., BATCHELOR, W. D., HUNT, L. A., WILKENSE, P.W.; SINGHE, U.; GIJSMAN, A.J.; RITCHIE, J. T. The DSSAT cropping system model. **European journal of agronomy**, v. 18, n. 3-4, p. 235-265, 2003.

KHOSHRAVESH, M.; MOSTAFAZADEH-FARD, B.; HEIDARPOUR, M.; KIANI, A. R. AquaCrop model simulation under different irrigation water and nitrogen strategies. **Water science and technology**, v. 67, n. 1, p. 232-238, 2013.

KO, J.; PICCINNI, G.; STEGLICH, E. Using EPIC model to manage irrigated cotton and maize. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 9, p. 1323-1331, 2009.

KÖPPEN, W. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra**. Fondo de Cultura Económica. México. 1948. 479p.

KUMAR, P.; SARANGI, A.; SINGH, D. K.; PARIHAR, S. S. Evaluation of AquaCrop model in predicting wheat yield and water productivity under irrigated saline regimes. **Irrigation and drainage**, v. 63, n. 4, p. 474-487, 2014.

MALAQUIAS, J.V.; DA SILVA, F. A.M.; EVANGELISTA, B.A. **Precipitação pluviométrica em Planaltina, DF: análise de dados da estação principal da Embrapa Cerrados, 1974 a 2003**. Embrapa Cerrados-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E). 2010.

ZACHARIAS, S.; HEATWOLE, C. D.; COAKLEY, C. W. Robust quantitative techniques for validating pesticide transport models. **Transactions of the ASAE**, 39(1), 47-54, 1996.

MEADE, B.; PURICELLI, E.; MCBRIDE, W.; VALDES, C.; HOFFMAN, L.; FOREMAN, L.; DOHLMAN, E. **Corn and soybean production costs and export competitiveness in Argentina, Brazil, and the United States**. EIB-154, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, June 2016.

MHIZHA, T.; GEERTS, S.; VANUYTRECHT, E.; MAKARAU, A.; RAES, D. Use of the FAO AquaCrop model in developing sowing guidelines for rainfed maize in Zimbabwe. **Water SA**, v. 40, n. 2, p. 233-244, 2014.

MKHABELA, M. S.; BULLOCK, P. R. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. **Agricultural Water Management**, v. 110, p. 16-24, 2012.

PAREDES, P.; DE MELO-ABREU, J. P.; ALVES, I.; PEREIRA, L. S. Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. **Agricultural water management**, v. 144, p. 81-97, 2014.

PAREDES, P.; WEI, Z.; LIU, Y.; XU, D.; XIN, Y.; ZHANG, B.; PEREIRA, L. S. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybeans in North China Plain. **Agricultural Water Management**, v. 152, p. 57-71, 2015.

PATRIGNANI, A.; OCHSNER, T.E. Canopeo: A powerful new tool for measuring fractional green canopy cover. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 6, p. 2312-2320, 2015.

PEREIRA, L. S.; PAREDES, P.; RODRIGUES, G. C.; NEVES, M. Modeling malt barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years. Assessing AquaCrop and SIMDualKc models. **Agricultural Water Management**, v. 159, p. 239-254, 2015.

MORIASI, D.; ARNOLD, J.; VAN LIEW, M.; BINGNER, R.; HARMEL, R.; VEITH, T. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Trans. ASABE** 50 (3), 885-900, 2007.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 438-447, 2009.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E. **Reference Manual AquaCrop (Version 4.0)**. 2012. Disponível em: <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>. Acesso em: 10 jun. 2020.

SANDHU, R.; IRMAK, S. Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 223, p. 105687, 2019.

SHRESTHA, N.; RAES, D.; SAH, S. K. Strategies to improve cereal production in the Terai region (Nepal) during dry season: simulations with aquacrop. **Procedia CIRP**, v. 19, p. 767-775, 2013.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 426-437, 2009.

STÖCKLE, C. O., DONATELLI, M.; NELSON, R. CropSyst, a cropping systems simulation model. **European journal of agronomy**, v. 18, n. 3-4, p. 289-307, 2003.

TODOROVIC, M.; ALBRIZIO, R.; ZIVOTIC, L.; SAAB, M. T. A.; STÖCKLE, C.; STEDUTO, P. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 509-521, 2009.

USDA. 10º levantamento USDA da safra 2018/19 - Fevereiro/19

VANUYTRECHT, E., RAES, D., STEDUTO, P., HSIAO, T. C., FERERES, E., HENG, L. K., VILA, M.G.; MORENO, P. M. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. **Environmental Modelling & Software**, v. 62, p. 351-360, 2014.

ZELEKE, K. T.; LUCKETT, D.; COWLEY, R. Calibration and testing of the FAO AquaCrop model for canola. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 6, p. 1610-1618, 2011.

2.3 Fator de resposta ao rendimento, coeficiente de cultura e produtividade de uso da água da soja submetida a diferentes níveis de déficit hídrico

Resumo

Mais da metade da área cultivada com soja no Brasil está localizada nas Savanas brasileiras (Cerrado). Embora a maior parte da produção venha de áreas de sequeiro, a soja tem sido cada vez mais irrigada, sendo necessário desenvolver coeficientes técnicos para o manejo de irrigação desta cultura. Os objetivos deste trabalho foram: (i) estimar o fator de resposta ao rendimento da cultura da soja; (ii) estimar os coeficientes de cultura; (iii) estimar o rendimento e a produtividade de uso de água da variedade de soja cultivar BRS 7581RR submetida a diferentes valores de déficits hídricos. Dois experimentos de campo foram conduzidos, sendo o primeiro no período de maio a agosto e o segundo de setembro a dezembro de 2019. Utilizou-se delineamento experimental em blocos casualizados com cinco tratamentos e quatro repetições. No tratamento TI, o manejo da irrigação foi conduzido de forma a manter um déficit de água no solo variando de 0 a 20%; no tratamento TII, a variação permitida do déficit hídrico foi de 20 a 40%; no tratamento TIII foi de 40 a 60%; em TIV foi de 60 a 80%; e de 80% a 100%, em TV. Nos experimentos 1 e 2, os valores médios do coeficiente de cultura nos estádios inicial e final foram 46,6% e 55,5%, 10,5% e 4%, maiores que os apresentados no boletim FAO 56, respectivamente. O fator de resposta ao rendimento foi 32% menor que o indicado no boletim FAO 33. No experimento 1, a produtividade de uso da água variou de 1 a 1,6 kg m⁻³ e no experimento 2 variou de 1 a 1,12 kg m⁻³.

Palavras-chave: Níveis de irrigação. Manejo de irrigação. Evapotranspiração atual. Modelos de rendimento.

2.3.1 Introdução

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de alimento, se destacando como produtor e exportador de várias commodities agrícolas, sendo responsável por 7,3% das exportações agrícolas mundiais (ALLEN; VALDES, 2016; MEADE et al., 2016; FAPDA, 2014). A soja é a principal *commodity* agrícola brasileira. Na safra agrícola 2018/2019, o Brasil exportou 79,5 milhões de toneladas, se configurando como o maior exportador de soja do mundo (USDA, 2019).

O Cerrado brasileiro tem se destacado no cultivo de soja, sendo a maior parte cultivada em condições de sequeiro (DA SILVA et al., 2019). A intensificação dos veranicos, entretanto, tem contribuído para o aumento do uso da irrigação, principal usuária de recursos hídricos, na soja. Cerca de 64% da área irrigada no Brasil está localizada na região do Cerrado (BRASIL, 2014), que concentra aproximadamente 80% de todos pivôs centrais do Brasil (ALTHOFF; RODRIGUES, 2019). Embora a irrigação desempenhe um papel importante no desenvolvimento econômico da região, o seu crescimento pode reduzir a disponibilidade hídrica e aumentar ainda mais as disputas pelo uso de recursos hídricos, os quais poderão se agravar ainda mais se a demanda de irrigação aumentar devido aos efeitos das mudanças climáticas.

Para compatibilizar a produção de alimentos com a disponibilidade hídrica na região, é necessário que sejam elaboradas estratégias de manejo que visem o uso eficiente da água, sendo, para isto, fundamental conhecer como diferentes níveis de déficit hídrico impactam no rendimento e na produtividade de uso da água da cultura. Melhorar a eficiência do uso de água aumentará a viabilidade econômica e a sustentabilidade ambiental da agricultura irrigada (ZHANG et al., 2004; MO et al., 2005; BASTIAANSEN; STEDUTO, 2017; LEVIDOW et al., 2014).

O uso de estratégias de manejo de irrigação com déficit hídrico, pode contribuir efetivamente para redução da demanda hídrica, com pouco impacto na qualidade e quantidade da produção, favorecendo o aumento na produtividade de uso de água e da rentabilidade das lavouras (RAGAB, 1996, FERERES; SORIANO, 2007, GEERTS; RAES, 2009, RUIZ-SÁNCHEZ et al., 2010). A adoção do déficit hídrico controlado na irrigação, pode, em alguns casos, implicar na redução de rendimento da cultura. Essa redução no rendimento, entretanto, pode ser economicamente menor quando comparada aos benefícios que podem ser obtidos com a utilização da água economizada, que pode, por exemplo, ser utilizada para irrigar outras culturas dentro da mesma área (KIRDA, 2002) ou em outra área por outro irrigante, ou pode ser utilizada para outro uso, contribuindo para reduzir os conflitos pelo uso de água na bacia hidrográfica.

Aplicar uma estratégia de irrigação fundamentada no déficit hídrico, requer conhecer como os déficits hídricos impactam no rendimento final da cultura. Uma das formas de avaliar esse impacto é por meio do fator de resposta do rendimento da cultura ao déficit hídrico, que representa a relação entre a redução relativa do

rendimento e a redução relativa da evapotranspiração (KIPKORIR et al., 2002; GREAVES; WANG, 2016; IGBADUN et al., 2007).

Para realizar a irrigação de forma total ou com déficit, as necessidades hídricas das culturas devem ser conhecidas, visando a obtenção de boas produtividades. Nesse sentido, o conhecimento do coeficiente de cultura (K_c) é fundamental, já que ele geralmente é parâmetro de entrada indispensável nos modelos de manejo que se fundamentam no balanço de água no solo. Embora exista na literatura uma vasta quantidade de informação sobre o K_c para a cultura da soja (WEI et al., 2015; KARAM et al., 2005; ODHIAMBO et al., 2012), pouco se tem feito para as condições da região do Cerrado brasileiro e menos ainda para as novas cultivares de soja que são lançadas anualmente no mercado brasileiro.

O presente trabalho objetivou: (i) estimar o fator de resposta ao rendimento da cultura da soja; (ii) estimar os coeficientes de cultura; (iii) estimar o rendimento e a produtividade de uso de água da variedade de soja BRS 7581RR submetida a diferentes valores de déficits hídricos.

2.3.2 Material e métodos

2.3.2.1 Área de estudo

Os experimentos foram instalados na Unidade de Referência em Manejo de Água (URMA) do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Embrapa Cerrados), localizada na região do Planalto Central do Bioma Cerrado (15°35'55,1"S, 47°42'27,4"W). Os experimentos foram conduzidos de maio a agosto e de outubro a dezembro de 2019 com a cultura da soja cultivar BRS 7581RR (tipo indeterminado).

O clima da região é classificado como Aw (KÖPPEN, 1948), com temperatura média do ar igual a 22°C e precipitação pluvial de 1.500 mm ano⁻¹, sendo concentrada entre os meses de outubro a março (MALAQUIAS et al., 2010). O solo da área é classificado como Latossolo vermelho, contendo 58% de argila. O solo possui valores médios de densidade global, ponto de murcha permanente e capacidade de campo nas camadas 0-20 cm e 20-40 cm iguais a 1,09 g cm⁻³, 0,23 cm³cm⁻³ e 0,35 cm³cm⁻³, respectivamente.

Os dados meteorológicos necessários para execução do trabalho foram obtidos de uma estação climatológica localizada a aproximadamente 2 km do experimento. A evapotranspiração de referência (ET₀) foi calculada pela equação FAO-Penman Monteith (ALLEN et al., 1998).

A irrigação foi realizada por meio de um sistema de irrigação por microaspersão. O sistema consistia de tubos de 16 mm conectados a uma adutora de 32 mm, ambos de polietileno. Os microaspersores estavam espaçados 3,0 m entre linhas e 5,0 m entre si. A pressão de serviço foi de 20 mca, vazão de 87 L h⁻¹ e intensidade de precipitação de 5,3 mm h⁻¹.

2.3.2.2 Manejo da cultura

As sementes da cultura foram semeadas com espaçamento de 0,5 m entre linhas e 18 plantas por metro linear, visando atingir a densidade de 360.000 plantas por hectare. A adubação foi feita no sulco de semeadura nas seguintes quantidades: 22,5 kg de N; 112,5 kg de P₂O₅ e 112,5 kg de K₂O por hectare, com base na análise química do solo e seguindo recomendações de Sousa e Lobato (2004). A semeadura do experimento 1 ocorreu em 06/05/2019 e a colheita em 09/08/2019. O segundo experimento (experimento 2), foi semeado em 09/09/2019 e colhido em 25/12/2019.

2.3.2.3 Delineamento experimental

Os experimentos foram montados no delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições (4 m x 2 m) em cada um dos cinco tratamentos (9 m x 20 m), totalizando vinte parcelas experimentais.

Os tratamentos foram: TI = déficit hídrico no solo variando de 0 a 20%; TII = déficit hídrico no solo variando de 20 a 40%; TIII = déficit hídrico no solo variando de 40 a 60%; TIV = déficit hídrico no solo variando de 60 a 80%; TV = déficit hídrico no solo variando de 80% a 100%. O déficit hídrico do solo, nos tratamentos, foi calculado seguindo a metodologia proposta por Berliner & Oosterhuis (1978).

2.3.2.4 Manejo da irrigação e medição da umidade do solo

A lâmina de irrigação aplicada foi calculada com base no valor da umidade atual do solo em cada tratamento, por meio da Equação 1.

$$LA = \frac{0,1 (\theta_{CC} - \theta_{atual})}{Ef} Ds Z \quad (1)$$

em que

- LA - lâmina de irrigação aplicada, mm
- θ_{CC} - umidade do solo na capacidade de campo, %;
- θ_{atual} - umidade atual do solo em cada tratamento, %;
- Ds - densidade global do solo, g cm⁻³;
- Z - profundidade do sistema radicular da cultura, cm;
- Ef - Eficiência do sistema de irrigação (Ef = 0,85).

A profundidade do sistema radicular da cultura foi avaliada semanalmente em cada tratamento. Para isto, retirava-se aleatoriamente três plantas na área de cada unidade experimental e media-se o comprimento máximo da raiz. A irrigação era aplicada quando a umidade do solo estava abaixo do limite mínimo definido para cada tratamento. A umidade do solo foi determinada por meio do método gravimétrico. Amostras de solo foram retiradas diariamente nas camadas de 0-20 e 20-40 cm em cada parcela experimental, pesadas e posteriormente levadas para serem secas em estufa à 105 °C por 24h. Após a secagem, as amostras de solo eram novamente pesadas. Após obtenção do peso úmido e seco do solo, obtinha-se a umidade atual do solo e procedia-se os cálculos da lâmina de irrigação a ser aplicada em cada tratamento.

2.3.2.5 Cálculo da evapotranspiração atual

A evapotranspiração atual da cultura (ET_a), em mm d⁻¹, foi calculada por meio da Equação 2 e 3.

$$ET_a = 10 [(\theta_{1i \ 0-20cm} - \theta_{2i-1 \ 0-20cm}) D_i], \text{ para } Z_i \leq 20 \text{ cm} \quad (2)$$

$$ET_a = 10 [(\theta_{1i \ 0-20cm} - \theta_{2i-1 \ 0-20cm}) D_i + (\theta_{1i \ 20-40cm} - \theta_{2i-1 \ 20-40cm}) D_i], \text{ para } Z_i > 20 \text{ cm} \quad (3)$$

em que

θ_{1i} = umidade volumétrica no momento da primeira amostragem, m³ m⁻³;
 θ_{2i} = umidade volumétrica no momento da segunda amostragem, m³ m⁻³
 D_i = espessura da camada, 20 cm.

2.3.2.6 Estimativa dos coeficientes médios de cultivo

O coeficiente de cultura foi obtido em todos os tratamentos, utilizando a Equação 4.

$$K_c = \frac{ET_a}{ET_0} \quad (4)$$

2.3.2.7 Estimativa do fator de resposta de rendimento da cultura

O fator de resposta de rendimento da cultura foi estimado utilizando a função de produção, representada pela Equação 5, proposta por Doorenbos e Kassam (1979). O fator de resposta de rendimento é o coeficiente angular da reta de regressão, que tem a relação de rendimentos no eixo da ordenada e a relação de evapotranspiração no eixo da abscissa.

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right) \quad (5)$$

em que

Y_a = rendimento atual da cultura, kg ha⁻¹, obtidos ao final do ciclo no tratamento com déficit hídrico;

Y_m = rendimento máximo da cultura, kg ha⁻¹, obtidos ao final do ciclo no tratamento sem déficit hídrico;

ET_a = evapotranspiração atual total obtida no tratamento com déficit hídrico (TII, TIII, TIV ou TV), mm;

ET_m = evapotranspiração atual total, obtida ao final do ciclo no tratamento sem déficit hídrico (TI).

2.3.2.8 Rendimento de grãos

Para avaliação do rendimento de grãos, foi selecionada aleatoriamente uma área em cada uma das quatro repetições e coletadas todas as plantas existentes em 2 metros lineares. As vagens de cada planta foram debulhadas e os grãos foram acondicionados em sacos de papel devidamente identificados e encaminhados para o laboratório de análises de sementes, onde foram pesados em balança analítica, e após a correção da umidade do grão para 13%, o rendimento foi determinado em cada tratamento. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, e as médias foram comparadas utilizando-se o teste de Tukey, adotando-se o nível de 5% de probabilidade.

2.3.2.9 Avaliação do desempenho da função de produção

A Equação 6 foi utilizada para avaliar o desempenho da função de produção de Doorenbos e Kassam. (1979) na simulação do rendimento da soja. O rendimento simulado foi comparado ao rendimento observado em campo.

$$Y_{a \text{ simulado}} = Y_m \left[1 - K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m} \right) \right] \quad (6)$$

Para avaliar o desempenho da função de produção, utilizou-se como indicadores estatísticos a raiz do erro quadrático médio (RMSE), eficiência do modelo de Nash-Sutcliffe (EF) e o coeficiente de determinação (r^2). Os indicadores foram calculados pelas Equações 7, 8 e 9.

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

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

$$r^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)(O_i - \bar{O}))^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

em que

- O_i = valore observados no experimento em campo da ordem i ;
- \bar{O} = média dos valores observados;
- P_i = valores simulados pelos modelos da ordem i ;
- \bar{P}_i = média dos valores simulados;
- n = número de observações.

2.3.2.10 Produtividade de uso da água

A produtividade de uso de água foi calculada em cada experimento e tratamento, em kg m^{-3} , em função da evapotranspiração atual total (PUA), por meio da Equação 10, conforme Payero et al. (2009).

$$PUA = \frac{Y_a}{ET_a} \quad (10)$$

2.3.3 Resultados

2.3.3.1 Avaliação dos dados climáticos observados

Na Figura 2.3.1 apresenta-se uma síntese dos dados climáticos observados durante a duração dos experimentos 1 e 2.

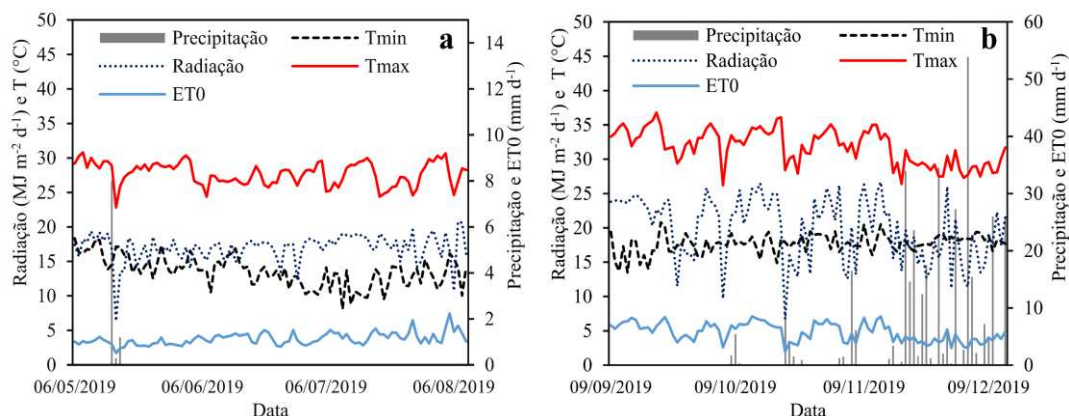


Figura 2.3.1. Temperaturas máxima (Tmax) e mínima (Tmin) do ar, radiação solar, precipitação e evapotranspiração de referência (ET0) ocorridas nos experimentos 1 (a) e 2 (b) durante o cultivo de soja.

Durante o experimento 1, foram observados três eventos chuvosos, ocorridos logo após o plantio da cultura, antes da emergência da planta, totalizando 9,5 mm. No experimento 2, foram observados 47 eventos chuvosos, com o primeiro evento ocorrido 10 dias após a emergência da cultura, e maiores frequências de precipitação a partir dos 71 dias após o plantio, totalizando 417,5 mm. No experimento 1, a ET_0 variou de 1,7 a 7,4 mm d⁻¹, atingindo seu valor máximo no mês de agosto. No experimento 2, os valores de ET_0 variaram de 1,9 a 7,1 mm d⁻¹. A temperatura média do ar variou de 16,9 a 23,2 °C no experimento 1 e de 20,4 a 28,1 °C no experimento 2. A radiação solar variou de 6,4 a 20,8 MJ m⁻² d⁻¹ no experimento 1, sendo o maior valor observado no mês de agosto; já no experimento 2, a radiação variou de 6,7 a 27,0 MJ m⁻² d⁻¹, com maior valor encontrado no mês de dezembro. A média de horas de luz durante o experimento 2 foi de 9 h d⁻¹ e no experimento 1 foi de 7 h d⁻¹.

2.3.3.2 Evapotranspiração atual

O somatório da evapotranspiração atual (ETA) semanal durante cada estágio de desenvolvimento da soja durante os experimentos 1 e 2 estão apresentados na Figura 2.3.2.

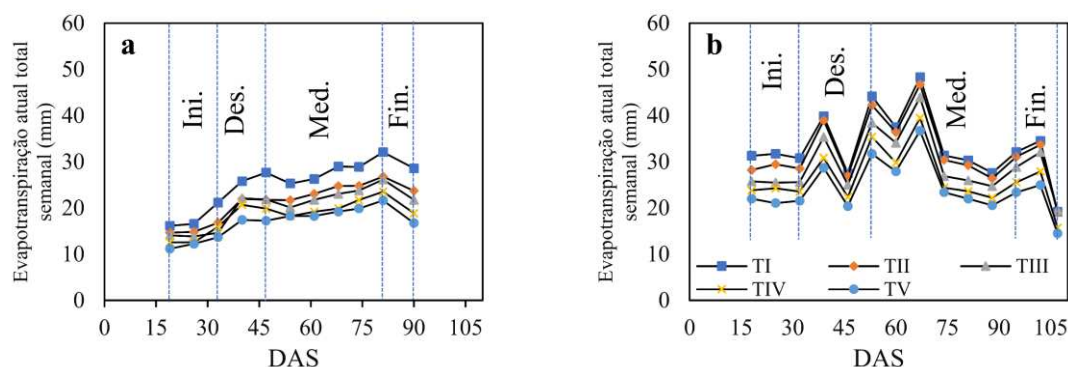


Figura 2.3.2. Evapotranspiração atual total semanal da cultura da soja irrigada sob níveis de déficit hídrico e seus respectivos estádios de desenvolvimento durante os experimentos 1 (a) e 2 (b). DAS = dias após a semeadura. TI = déficit hídrico no solo variando de 0 a 20% da; TII = déficit hídrico no solo variando de 20 a 40%; TIII = déficit hídrico no solo variando de 40 a 60%; TIV = déficit hídrico no solo variando de 60 a 80%; TV = déficit hídrico no solo variando de 80% a 100%. Ini = estágio inicial; Des = estágio de desenvolvimento; Med = estágio de desenvolvimento médio; Fin = estágio final. Linhas tracejadas verticais azuis indicam o início e final do estágio de desenvolvimento da soja.

No experimento 1, o maior valor de ETA foi observado no tratamento TI (277,5 mm) e o menor valor no tratamento TV (185,8 mm). Comparando-se os valores de

ETa total no ciclo do TI com os valores observados nos tratamentos TII, TIII, TIV e TV, observou-se uma redução de 15,4%, 19,6%, 26,8% e 33,5%, respectivamente. A ETa foi menor no estágio inicial de desenvolvimento em todos os tratamentos, com tendência a aumentar nos estádios de desenvolvimento e desenvolvimento médio. Durante o experimento 2, a maior demanda hídrica da cultura foi constatada no tratamento TI (466 mm), e a menor no tratamento TV (339 mm) e os tratamentos TII, TIII, TIV e TV obtiveram reduções na ETa total da ordem de 4%, 10,5%, 20,6% e 27,2%, respectivamente, em comparação ao tratamento TI.

2.3.3.3 Coeficiente de cultura

Os valores dos coeficientes de cultura calculado e proposto pelo método FAO 56 durante os estádios inicial, médio e final, para cada tratamento nos experimentos 1 e 2, estão apresentados na Figura 2.3.3.

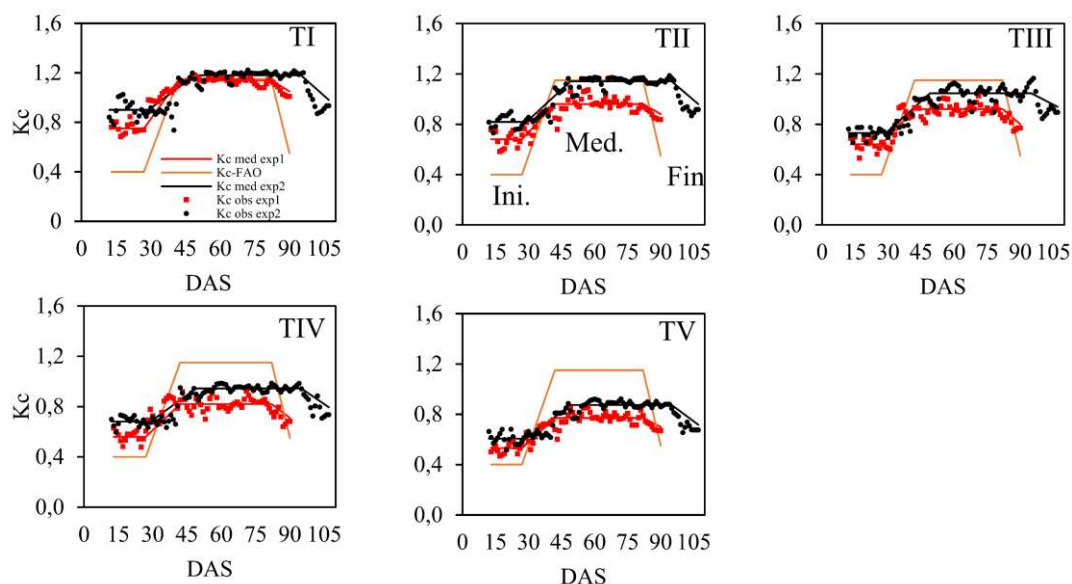


Figura 2.3.3. Valores médios e diários dos coeficientes de cultura calculados e propostos pelo método FAO 56 durante os estádios inicial, médio e final, para todos os tratamentos durante os experimentos 1 e 2. DAS = dias após a semeadura. TI = déficit hídrico no solo variando de 0 a 20%; TII = déficit hídrico no solo variando de 20 a 40%; TIII = déficit hídrico no solo variando de 40 a 60%; TIV = déficit hídrico no solo variando de 60 a 80%; TV = déficit hídrico no solo variando de 80% a 100%. Kc obs exp 1 = Kc diário observado no experimento 1; Kc obs exp 2 = Kc diário observado no experimento 2; Kc med exp1 = Kc médio para os estádios inicial, médio e final do experimento 1. Kc med exp2 = Kc médio para os estádios inicial, médio e final do experimento 2; Kc-FAO = Kc médio dos estádios inicial, médio e final, proposto pelo boletim FAO 56. Ini = estágio inicial; Med = estágio de desenvolvimento médio; Fin = estágio final.

Observa-se que os valores de Kc tendem a aumentar do estágio inicial até o desenvolvimento médio, durante o desenvolvimento médio há uma estabilização do

Kc e após este estágio observa-se um decréscimo até o estágio final da cultura. Estes comportamentos foram observados em todos os tratamentos nos dois experimentos. No tratamento TI do experimento 1, o Kc médio para os estágios inicial, médio e final, foram 0,75, 1,14 e 1,05 respectivamente, já no boletim FAO 56, os valores de Kc propostos são 0,40, 1,15 e 0,55. Comparando os tratamentos TII, TIII, TIV e TV com o tratamento TI, observa-se que o Kc médio nos estágios inicial, médio e final, foram menores em 9,3%, 15,8% e 16,2% (TII); 14,7%, 19,3% e 23,8% (TIII); 25,3%, 28% e 32,4% (TIV) e 29,3%, 32,5% e 33,3% (TV), respectivamente. No experimento 2, o tratamento TI obteve valores médios de Kc durante os estágios inicial, médio e final, iguais a 0,90, 1,18 e 0,98 respectivamente, sendo estes valores maiores em 55,5%, 2,5% e 43,9% respectivamente, quando comparado com os valores propostos pelo boletim FAO 56. Comparando os tratamentos TII, TIII, TIV e TV com o tratamento TI, observa-se que o Kc médio nos estágios inicial, médio e final, foram menores em 9,0%, 3,4% e 2% (TII); 18,8%, 11,3% e 4,3% (TIII); 24,3%, 20% e 18,9% (TIV) e 32,6%, 26% e 26,7% (TV), respectivamente.

2.3.3.4 Rendimento de grãos

Na Tabela 2.3.1 apresenta-se o rendimento de grãos obtidos nos experimentos 1 e 2 para os diferentes tratamentos. Observou-se que houve diferença estatística no rendimento observado nos tratamentos nos dois experimentos ($p < 0,05$).

Tabela 2.3.1. Rendimento médio de grãos de soja cultivada nos diferentes tratamentos com e sem déficit hídrico no experimento 1 e 2

| Tratamento | Rendimento (kg ha ⁻¹) | |
|------------|-----------------------------------|---------------|
| | experimento 1 | experimento 2 |
| TI | 3709,2a | 5133,8a |
| TII | 3554,2a | 4887,2b |
| TIII | 3465,5a | 4634,2c |
| TIV | 2057,8b | 3654,0d |
| TV | 1854,5b | 3392,0e |

Letras diferentes nas colunas indicam diferenças significativas de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$). TI = déficit hídrico no solo variando de 0 a 20%; TII = déficit hídrico no solo variando de 20 a 40%; TIII = déficit hídrico no solo variando de 40 a 60%; TIV = déficit hídrico no solo variando de 60 a 80%; TV = déficit hídrico no solo variando de 80% a 100%.

No experimento 1, os rendimentos da soja observados nos tratamentos TI, TII e TIII não diferiram estatisticamente entre si. Os rendimentos obtidos nos tratamentos TIV e TV foram estatisticamente iguais. Por outro lado, comparando os rendimentos

da soja obtidos nos tratamentos TIV e TV com o TI, observou-se uma redução de 44,5% e 50%, respectivamente. No experimento 2, o maior rendimento foi observado no tratamento TI. Os tratamentos TII, TIII, TIV e TV obtiveram reduções no rendimento, quando comparados com o TI, da ordem de 4,8%, 9,7%, 40,5% e 33,9%, respectivamente. Os rendimentos observados nos tratamentos TI, TII, TIII, TIV e TV, do experimento 1, foram 27,7%, 27,3%, 25,2%, 43,7% e 45,3% menores, respectivamente, que os observados nos mesmos tratamentos no experimento 2.

2.3.3.5 Fator de resposta de rendimento da cultura

Os valores de diminuição relativa do rendimento em função da diminuição relativa da ETa observados nos experimentos 1 e 2, estão apresentados na Figura 2.3.4.

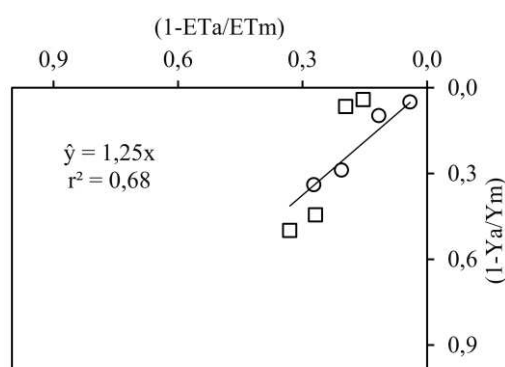


Figura 2.3.4. Fator de resposta ao rendimento da soja sob déficit hídrico.

O coeficiente angular da reta de regressão, ou seja, o fator de resposta de rendimento da soja, que expressa a relação entre a diminuição relativa do rendimento e a diminuição da evapotranspiração atual, apresentou valor igual a 1,25.

2.3.3.6 Desempenho da função de produção

Na Figura 2.3.5 apresenta-se as estimativas dos rendimentos atuais simulado pela função de Doorenbos e Kassam (1979), utilizando o K_y de 1,25, em função do rendimento observado.

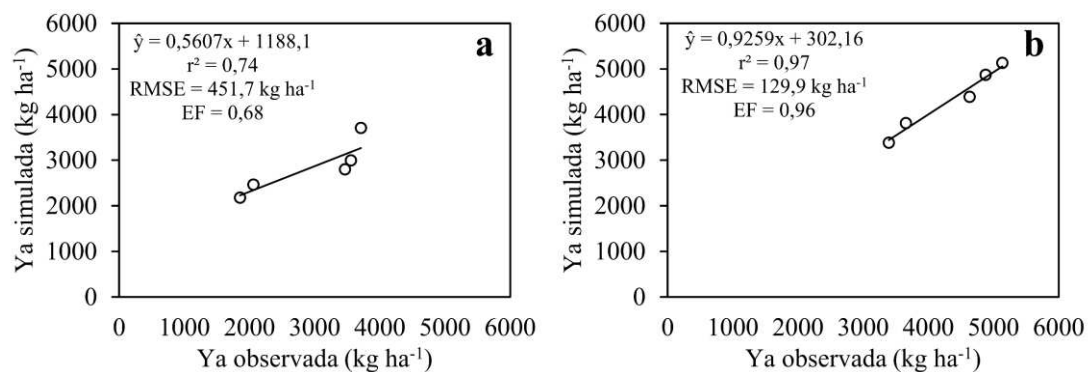


Figura 2.3.5. Rendimento atual (Y_a) observado e simulado pelo modelo de Doorenbos e Kassam (1979) dos experimentos 1 (a) e 2 (b).

No experimento 1, observou-se que o modelo subestimou o rendimento da soja em 15,7% e 19,2% nos tratamentos TII e TIII, respectivamente, e superestimou em 19,8% e 14,8% nos tratamentos TIV e TV, respectivamente. No experimento 2, observou-se subestimativa do rendimento de 0,1%, 5,3% e 0,2% nos tratamentos TII, TIII e TV, respectivamente, e superestimativa de 4,3% no tratamento TIV. Em geral, a função de produção simulou o rendimento com elevados valores de r^2 , baixos valores de RMSE e EF (Figura 2.3.5).

2.3.3.7 Produtividade de uso de água

Na Figura 2.3.6 apresenta-se a produtividade de uso de água (PUA) obtida nos experimentos 1 e 2 para os diferentes tratamentos. Observa-se que houve diferença estatística entre os tratamentos nos dois experimentos ($p < 0,05$).

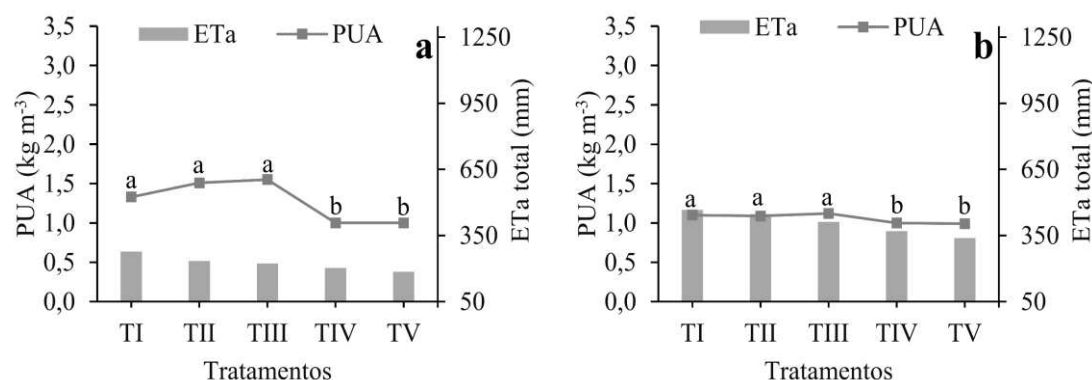


Figura 2.3.6. Produtividade de uso de água da soja cultivada com diferentes níveis de déficit hídrico nos experimentos 1 (a) e 2 (b). TI = déficit hídrico no solo variando de 0 a 20%; TII = déficit hídrico no solo variando de 20 a 40%; TIII = déficit hídrico no solo variando de 40 a 60%; TIV = déficit hídrico no solo variando de 60 a 80%; TV = déficit hídrico no solo variando de 80% a 100%. Letras diferentes na barra de cada tratamento representam diferenças significativas entre os tratamentos após ANOVA (teste de Tukey, $p < 0,05$).

No experimento 1, a PUA nos tratamentos TI, TII e TIII foram estatisticamente iguais. Os menores valores foram observados nos tratamentos TIV e TV, com reduções em ambos, da ordem de 24,8%, quando comparados ao tratamento TI. No experimento 2, observou-se o mesmo comportamento do experimento 1, os tratamentos TIV e TV obtiveram uma redução na PUA iguais a 9% e 10% respectivamente. As PUAs observadas nos tratamentos TI, TII, TIII, do experimento 1, foram maiores em 17,3%, 27,8% e 27,7%, respectivamente, quando comparadas aos mesmos tratamentos do experimento 2. Os valores de PUA observados nos tratamentos TIV e TV foram iguais nos dois experimentos.

2.3.4 Discussão

Nos experimentos 1 e 2, observou-se uma menor demanda hídrica da cultura da soja BRS 7581RR durante o estágio inicial. Esse comportamento, entretanto, se modifica a partir do estágio de desenvolvimento médio, quando se observa um aumento da demanda. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que nesses dois estágios estão incluídas as fases fenológicas reprodutivas (R) e de formação de produção, momento este, em que a planta demanda maior quantidade de água para garantir a produção final. Isto está de acordo com o observado em outros trabalhos (ANAPALLI et al., 2018; WEI et al., 2018), que mostraram que a soja aumenta a demanda hídrica, devido ao rápido crescimento vegetativo, a partir do estágio R1.

Os coeficientes da cultura para cada estágio de desenvolvimento foram impactados pelos déficits hídricos aplicados. Tanto no experimento 1 como no 2, em todos os tratamentos, observa-se que os menores valores de K_c ocorreram no estágio inicial (Figura 2.3.3). Isto é devido ao fato de que durante o estágio inicial a cobertura do solo é menor (menor área foliar), predominando a evaporação do solo (ALLEN et al., 1998). Os valores de K_c encontrados no presente estudo diferiram em média 51% e 45,8%, nos estágios inicial e final, respectivamente, daqueles propostos pelo FAO 56, e isso pode ser devido a cultivar de soja estudada e as condições edafoclimáticas da região. O tratamento TI teve o valor médio de K_c durante o estágio de desenvolvimento médio igual a 1,14, apresentando diferença média de 1,7% em comparação com o valor proposto pelo FAO 56. Nos tratamentos com déficit hídrico, observou-se redução dos valores de K_c a medida que o déficit hídrico foi se intensificando, sendo que os valores de K_c médio nos estágios de desenvolvimento inicial, médio e final, dos tratamentos TII, TIII, TIV e TV, obtiveram reduções médias da ordem de 9,2%, 9,6% e 9% (TII), 16,4%, 15,3%, 14% (TIII), 24,8%, 24%, 25,7% (TIV) e 31%, 29,3% e 30% (TV), respectivamente. Durante o experimento 2, observa-se que os valores de K_c médio para os estágios inicial, médio e final de todos os tratamentos, foram maiores que no experimento 1. Essa diferença entre os experimentos, está relacionada com a mudança nas características de crescimento da soja, devido as condições climáticas diferentes em cada experimento, já que fatores como a quantidade de horas de luz e temperatura máxima do ar, exercem grande influência no desenvolvimento da cultura da soja (FARIAS et al., 2007; FERREIRA et al., 2007; KANTOLIC, 2008; SOUZA et al., 2013).

O rendimento foi influenciado significativamente ($p < 0,05$) pelo déficit hídrico aplicado em cada tratamento. Nos experimentos 1 e 2, os menores rendimentos foram observados nos tratamentos TIV e TV. Nesses tratamentos, observou-se uma redução na ETa de 26,6% e 33% (experimento 1), 20,6% e 27,3% (experimento 2), ou seja, essas reduções na ETa, decorrentes do déficit hídrico aplicado, pode ter ocasionado a diminuição do rendimento destes tratamentos, pois, segundo Parry et al. (2002), quanto maior a intensidade do déficit hídrico aplicado maior é o comprometimento das funções metabólicas da cultura o que resulta na diminuição do ATP, que está aliada a redução do transporte de elétrons e fotofosforilação (CATUCHI et al. 2011). Além disso, em condições de déficit hídrico o tilacóide pode ter sofrido danos estruturais causados pela diminuição do teor de água (LAWLOR; CORNIC, 2002), levando a redução da eficiência do aparelho fotossintético das plantas, causando a redução do rendimento. Observou-se que o rendimento da soja BRS 7581RR diminuiu quando o conteúdo de água no solo ficou abaixo de 40%.

Nos dois experimentos, o rendimento máximo foi observado no tratamento TI (Tabela 2.3.1), sendo 27,8% maior no experimento 2. Essa diferença pode ser atribuída as condições climáticas, principalmente na quantidade de horas de luz e temperatura máxima do ar, que exercem grande influência no desenvolvimento da cultura da soja (FARIAS et al., 2007; FERREIRA et al., 2007; KANTOLIC, 2008; SOUZA et al., 2013). No experimento 2, observou-se temperatura máxima média igual a 31,6°C, cerca de 12,3% maior que no experimento 1, e a quantidade média de radiação por dia igual a 19,9 MJ m⁻² d⁻¹, valor cerca de 14,9 % maior que no experimento 1. Além disso, no experimento 1, a média diária de horas de luz foi de 7 h d⁻¹, valor 24% menor que o observado no experimento 2.

O valor do fator de resposta de rendimento obtido neste estudo para a soja submetida ao déficit hídrico durante o ciclo foi igual a 1,25. O Ky representa uma medida da sensibilidade relativa de uma cultura ao déficit hídrico (FERREIRA; GONÇALVES, 2007), quanto maior o seu valor mais sensível é a planta ao déficit hídrico. Considera-se que a planta é muito sensível ao déficit hídrico quando o $Ky > 1$ e pouco sensível quando o $Ky < 1$ (STEDUTO et al., 2012). Portanto, de acordo com esse critério, a soja BRS 7581RR é uma cultura sensível ao déficit hídrico.

Steduto et al. (2012) sugeriram valor de fator de rendimento para a soja igual a 0,85, valor 32% menor que o encontrado no presente estudo. Li et al., (2020), estudando o efeito de déficits hídricos na soja para as condições de Pequim, China,

encontraram um fator de rendimento para a soja igual a 1,12, valor este que é menor em 10,4% que o valor encontrado no presente estudo. Essa diferença nos valores de K_y indica a importância de se realizar estudos contínuos considerando as especificidades da região e de novas cultivares.

A equação proposta por Doorenbos e Kassam (1979), para estimativa do rendimento atual, apresentou desempenho satisfatório na estimativa do rendimento da soja BRS 7581RR, o que pode ser comprovado pelos baixos valores de RMSE, que correspondeu a 15% e 3% do valor médio observado de rendimento de todos os tratamentos do experimento 1 e 2, respectivamente. Estes valores estão de acordo com os recomendados por Adeboye et al. (2019), que consideram valor de RMSE de 15% como bom. Além disso, observou-se altos valores de r^2 ($> 0,7$) e EF ($> 0,65$) durante os dois experimentos. Os valores de EF encontrados no presente estudo é classificado como bom para modelagem agrícola, conforme Moriasi et al. (2007).

Uma maior redução no valor da PUA foi observada nos tratamentos TIV e TV, indicando uma redução, proporcionalmente, maior no rendimento do que na quantidade de água aplicada. Considerando a PUA, em termos médios, a melhor estratégia adotada foi a do TIII. Nesse tratamento observa-se que o rendimento obtido no experimento 1, quando comparado com os tratamentos TIV e TV do mesmo experimento, foi em média 40,6% e 46,5% maior, respectivamente, e no experimento 2, essa diferença foi maior em média 21,5% e 26,8%, respectivamente. Além disso, a quantidade de água aplicada no tratamento TIII foi 20% e 11,6% menor que no tratamento TI do experimento 1 e 2, respectivamente. Estes resultados confirmam que a aplicação de déficit hídrico controlado pode aumentar a produtividade de uso da água da soja. Em situações onde a água for fator limitante, pode-se utilizar um déficit hídrico no solo variando de 40% a 60%, sendo este intervalo o que utiliza menor quantidade de água, com menor redução proporcional do rendimento.

2.3.5 Conclusões

O coeficiente de cultura médio da soja BRS 7581RR variou de 0,75 a 1,18.

O rendimento da soja BRS 7581RR reduziu em média 42% para os déficits hídricos aplicados nos intervalos de 60% a 80% e de 80% a 100%. Nos intervalos 20% a 40% e 40% a 60%, o rendimento médio reduziu de 5,6% e 4,5%, respectivamente, quando comparados ao tratamento com déficit hídrico variando de 80% a 100%.

O fator de rendimento da soja BRS 7581RR foi igual a 1,25.

A produtividade de uso da água foi igual estatisticamente entre os tratamentos com déficits hídricos variando de 40% a 60%, 60% a 80% e 80% a 100%.

Considerando a produtividade de uso da água, a melhor estratégia adotada foi a do tratamento TIII, que teve o déficit hídrico no solo variando de 40% a 60%.

2.3.6 Referências bibliográficas

ADEBOYE, O. B.; SCHULTZ, B.; ADEKALU, K. O.; PRASAD, K. C. Performance evaluation of AquaCrop in simulating soil water storage, yield, and water productivity of rainfed soybeans (*Glycine max* L. merr) in Ile-Ife, Nigeria. **Agricultural water management**, v. 213, p. 1130-1146, 2019.

ALLEN, E.; VALDES, C. **Brazil's Corn Industry and the Effect on the Seasonal Pattern of U.S. Corn Exports**. AES-93, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, June 2016.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998.

ALTHOFF D.; RODRIGUES LN. The expansion of center-pivot irrigation in the Cerrado biome. **IRRIGA**, v. 1, n. 1, p. 56-61, 2019.

ANAPALLI, S.S.; FISHER, D.K.; REDDY, K.N.; WAGLE, P.; GOWDA, P.H.; SUI, R. Quantifying soybean evapotranspiration using an eddy covariance approach. **Agricultural Water Management**, v. 209, p. 228-239, 2018.

BASTIAANSEN, W.G.M.; STEDUTO, P. The water productivity score (WPS) at global and regional level: Methodology and first results from remote sensing measurements of wheat, rice and maize. **Sci. Total Environ**, [s.l.], v. 575, p. 595-611, jan. 2017.

BERLINER, P. R.; OOSTERHUIS, D. M. Effect of root and water distribution in lysimeters and in the field on the onset of crop water stress. **Irrigation science**, v. 8, n. 4, p. 245-255, 1987.

BRASIL. **Análise territorial para o desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil**. Brasília: MI, 2014, 217 p.

CATUCHI, T. A.; VÍTOLO, H. F.; BERTOLLI, S. C.; SOUZA, G. M. Tolerance to water deficiency between two soybean cultivars: transgenic versus conventional. **Ciência Rural**, v. 41, n. 3, p. 373-378, 2011.

DA SILVA E.H.; GONÇALVES, A.O.; PEREIRA, R.A.; JÚNIOR I.M.F.; SOBENKO, L.R.; MARIN, F.R. Soybean irrigation requirements and canopy-atmosphere coupling in Southern Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 218, p. 1-7, 2019.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. **Yield Response to Water**. Irrigation and Drainage Paper 33. Rome: FAO, 1998. 257 p.

FAPDA (FOOD AND AGRICULTURE POLICY DECISION ANALYSIS). 2014 **Brazil country fact sheet on food and agriculture policy trends**. [s.l.], FAPDA, 2014. 5 p.

FARIAS, J.R.B.; NEPOMUCENO, A.L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: EMBRAPA, (Circular técnica, 48). 2007.

FERERES, E.; SORIANO, M. A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal Of Experimental Botany**, [s.l.], v. 58, n. 2, p. 147-159, 6 nov. 2006.

FERREIRA, T. C.; GONÇALVES, D. A. Crop-yield/water-use production functions of potatoes (*Solanum tuberosum*, L.) grown under differential nitrogen and irrigation treatments in a hot, dry climate. **Agricultural water management**, v. 90, n. 1-2, p. 45-55, 2007.

FERREIRA, W.P.M.; COSTA, L.C.; SOUZA, C.F. Modelo de estimativa de produtividade de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) em função da variabilidade da temperatura. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 15, n. 4, p. 400-407. 2007.

GEERTS, A.; RAES, D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 96, n. 9, p. 1275-1284, set. 2009.

GREAVES, G. E.; WANG, Y. Yield response, water productivity, and seasonal water production functions for maize under deficit irrigation water management in southern Taiwan. **Plant Production Science**, [s.l.], v. 20, n. 4, p. 353-365, 22 ago. 2017.

IGBADUN, H. E.; TARIMO, A. K. P.R.; SALIM, B. A.; MAHOO, H. F. Evaluation of selected crop water production functions for an irrigated maize crop. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 94, n. 1-3, p. 1-10, dez. 2007.

KANTOLIC, A.G. Control ambiental y genético de la fenología del cultivo de soja: impactos sobre el rendimiento y la adaptación de genótipos. **Revista de la Facultad de Agronomía**, Buenos Aires, v. 28, n. 1, p. 63- 88. 2008.

KARAM, F.; MASAAD, R.; SFEIR, T.; MOUNZER, O.; ROUPHAEL, Y. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 75, n. 3, p. 226-244, jul. 2005.

KIPKORIR, E.C.; RAES, D.; MASSAWE, B. Seasonal Water Production Functions and Yield Response Factors for Maize and Onion in Perkerra, Kenya. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 56, n. 3, p. 229-240, ago. 2002.

KIRDA, C. Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance. **Deficit irrigation practices. FAO Water Rep.** 22, 3–10. 2002.

LAWLOR, D.W.; CORNIC, G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. **Plant, cell & environment**, v. 25, n. 2, p. 275-294, 2002.

LEVIDOW, L.; ZACCARIA, D.; MAIA, R.; VIVAS, E.; TODOROVIC, M.; SCARDIGNO, A. Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of

innovative practices. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 146, p. 84-94, dez. 2014.

LI, S.; XIE, Y.; LIU, G.; WANG, J.; LIN, H.; XIN, Y.; ZHAI, J. Water Use Efficiency of Soybean under Water Stress in Different Eroded Soils. **Water**, 12(2), 373, 2020.

MALAQUIAS, J.V.; DA SILVA, F. A.M.; EVANGELISTA, B.A. **Precipitação pluviométrica em Planaltina, DF: análise de dados da estação principal da Embrapa Cerrados, 1974 a 2003**. Embrapa Cerrados-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E). 2010.

MEADE, B.; PURICELLI, E.; MCBRIDE, W.; VALDES, C.; HOFFMAN, L.; FOREMAN, L.; DOHLMAN, E. **Corn and soybean production costs and export competitiveness in Argentina, Brazil, and the United States**. EIB-154, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, June 2016.

MO, X.; LIU, S.; LIN, Z.; XU, Y.; XIANG, Y.; MCVICAR, T.R. Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SWAT-crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain. **Ecological Modelling** [s.l.]. vol. 183, no. 2-3, p. 301-322. Abr 2005.

MORIASI, D.; ARNOLD, J.; VAN LIEW, M.; BINGNER, R.; HARMEL, R.; VEITH, T. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Trans. ASABE** 50 (3), 885-900, 2007.

ODHIAMBO, L. O.; IRMAK, S. Evaluation of the impact of surface residue cover on single and dual crop coefficient for estimating soybean actual evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, v. 104, p. 221-234, 2012.

OLIVEIRA, E. C.; CARVALHO, J. D. A.; ALMEIDA, E. F.; REZENDE, F. C.; SANTOS, B. D.; MIMURA, S. N. Evapotranspiração da roseira cultivada em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 314-321, 2014.

PARRY, M.A.; ANDRALOJC, P.J.; KHAN, S.; LEA, P.J.; KEYS, A.J. Rubisco activity: effects of drought stress. **Annals of botany**, v. 89, n. 7, p. 833-839, 2002.

PAYERO, J. O.; TARKALSON, D. D.; IRMAK, S.; DAVISON, D.; PETERSEN, J. L. Effect of timing of a deficit-irrigation allocation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency and dry mass. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 96, n. 10, p. 1387-1397, out. 2009.

RAGAB, R. Constraints and applicability of irrigation scheduling under limited water resources, variable rainfall and saline conditions. In: Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO) (ed.), **Irrigation Scheduling: from Theory to Practice**. Rome (Italy), 1996. pp. 149-165.

RUIZ SÁNCHEZ, M.C.; DOMINGO, R.; CASTEL, J.R (2010). Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain. **Spanish journal of agricultural research**, n. 2, p. 5-20, 2010.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. Planaltina, Embrapa Cerrados. 416p.

SOUZA P.J.O.P.; SOUZA, A.M.L.; SAMPAIO, L.S. Soybean development and thermal requirement under the climatic conditions of Paragominas, Pará state, Brazil. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 56, n. 4, p. 371-375, 2013.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; RAES, D. **Crop yield response to water**. Rome: fao. 2012.

STEWART, J.I.; HAGAN, R.M.; PRUITT, W.O.; HANKS, R.J.; RILEY, J.P.; DANIELSON, R.E.; FRANKLIN, W.T.; JACKSON, E.B. **Optimising crop production through control and water salinity levels**. Utah water research lab. PRWG151-1, Utah State University, Utah Logan. 1977.

USDA. **10º levantamento USDA da safra 2018/19** - Fevereiro/19

WEI, Y.; JIN, J.; JIANG, S.; NING, S.; LIU, L. Quantitative response of soybean development and yield to drought stress during different growth stages in the Huaibei Plain, China. **Agronomy**, v. 8, n. 7, p. 97, 2018.

WEI, Z.; PAREDES, P.; LIU, Y.; CHI, W. W.; PEREIRA, L. S. Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of soybean in North China Plain. **Agricultural water management**, v. 147, p. 43-53, 2015.

ZHANG, Y.; KENDY, E.; QIANG, Y.; CHANGMING, L.; YANJUN, S.; HONGYONG, S. Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain. **Agricultural water management**, v. 64, n. 2, p. 107-122, 2004.

2.4 Avaliação do fator de resposta ao rendimento e da produtividade da água da soja sob déficit hídrico aplicado em estádios específicos de crescimento

Resumo

Nos últimos anos, a agricultura irrigada no Cerrado teve uma rápida expansão, principalmente em áreas cultivadas com soja, o que contribuiu para aumentar as disputas por recursos hídricos. O cenário atual de uso da água na região mostra que é essencial aprimorar ferramentas e trazer novas informações para auxiliar o gerenciamento de recursos hídricos na escala da bacia hidrográfica. Este estudo teve como objetivo estimar o fator de resposta de rendimento e a produtividade no uso da água de uma nova cultivar de soja (BRS 7581RR) sob déficit hídrico aplicado em estágios específicos de desenvolvimento. De maio a agosto e de setembro a dezembro de 2019, foram realizados dois experimentos de campo delineados em blocos casualizados, com cinco tratamentos e quatro repetições. No tratamento controle (SE), a irrigação foi realizada para atender a demanda total de água da cultura em todas as etapas do desenvolvimento. Nos demais tratamentos, a irrigação foi suspensa em determinadas etapas do desenvolvimento da cultura (VC-V4, V5-R1, R1-R5 e R5-R7) e, em seguida, retomada. O rendimento da soja em condições de déficit hídrico aplicado em estágios específicos de desenvolvimento da cultura foi simulado pelas funções de produção da cultura propostas por Jensen (1968), Stewart et al. (1977) e Minhas et al. (1974). Os resultados mostraram maior redução no rendimento de soja quando o déficit hídrico foi aplicado nos estágios R1-R5 e R5-R7. A produtividade da água no estágio R5-R7, no entanto, foi semelhante à observada no tratamento sem déficit hídrico. Os fatores de resposta ao rendimento foram maiores nos estágios R1-R5 e R5-R7 em todos os modelos estudados.

Palavras-chave: Irrigação por déficit. Manejo de irrigação. Evapotranspiração atual. Modelos de rendimento.

2.4.1 Introdução

O Brasil desempenha um papel importante na produção mundial de alimentos. O país se destaca como produtor e exportador de várias commodities agrícolas, respondendo por aproximadamente 7,3% das exportações agrícolas globais (ALLEN; VALDES, 2016; MEADE et al., 2016; FAPDA, 2014). Com uma exportação de 74 milhões de toneladas de soja em grãos, que gerou uma receita de US\$ 26 milhões de

dólares no ano de 2019, o Brasil é o maior exportador de soja do mundo (MAPA, 2020). A maior parte dessa produção vem de áreas de sequeiro (DA SILVA et al., 2019).

A soja (*Glycine max* L.) é a principal commodity agrícola brasileira. Na safra de 2016/17, mais da metade (50.4%) da área cultivada com soja no Brasil (3,9 Mha) estava concentrada no bioma Cerrado (AGROSATÉLITE, 2018). O Cerrado é o segundo maior bioma do país em extensão. Ocupando uma área aproximada de 204 milhões de hectares, é considerado a principal fronteira agrícola do Brasil. Nos últimos 30 anos, tem-se observado um expressivo e contínuo crescimento da agricultura na região, que responde atualmente por 44.6% de toda a produção de cereais, leguminosas e oleaginosas produzidas no país (IBGE, 2018).

Embora seja uma cultura tipicamente cultivada em condições de sequeiro, a soja tem sido cada vez mais cultivada em sistemas irrigados, o que tem contribuído para aumentar a demanda de água na região do Cerrado, que já enfrenta problemas hídricos em algumas de suas principais bacias hidrográficas. Cerca de 64% da área irrigada no Brasil está na região do Cerrado (BRASIL, 2014), que concentra aproximadamente 80% de todos pivôs centrais do Brasil (ALTHOFF; RODRIGUES, 2019). Considerando o atual cenário de uso de água na região e o surgimento de conflitos por esse recurso, é fundamental avaliar e aperfeiçoar ferramentas que possam auxiliar na gestão de recursos hídricos na escala de bacia hidrográfica. Nessa região, é cada vez mais importante produzir mais com uma menor quantidade de água.

Para melhorar o desempenho da irrigação praticada na região, é fundamental desenvolver estratégias de manejo que possam reduzir o uso de recursos hídricos sem comprometer a produção agrícola. Neste contexto, várias estratégias de irrigação podem ser utilizadas, como, por exemplo, a irrigação com déficit hídrico que, se conduzida adequadamente, pode contribuir efetivamente para redução do uso de recursos hídricos, com pouco impacto na qualidade e quantidade da produção, favorecendo o aumento na produtividade de uso de água e na rentabilidade das lavouras (RAGAB, 1996, FERERES; SORIANO, 2006, GEERTS; RAES, 2009, RUIZ-SÁNCHEZ et al., 2010). Estratégias de irrigação com aplicação de estresse hídrico planejado são promissoras para otimizar as formas de manejo na agricultura irrigada e para manter o rendimento alto das culturas frente a escassez de água (ALI; TALUKDER, 2008; BEHERA; PANDA, 2009; MUSTAFA et al., 2017).

Aplicar uma estratégia de irrigação com base no déficit hídrico, requer o conhecimento da resposta da cultura ao estresse hídrico nos seus diferentes estádios de crescimento. A redução de rendimento devido ao estresse hídrico pode ser expressa por uma curva, traçada entre a redução relativa do rendimento e a redução relativa da evapotranspiração. A inclinação dessa curva representa o fator de resposta de rendimento da cultura ao estresse hídrico. Isto é, ela representa, a forma como o rendimento da cultura responde ao estresse hídrico (KIPKORIR et al., 2002; GREAVES; WANG, 2016; IGBADUN et al., 2007; STEWART et al., 1977; HANKS, 1983; DOORENBOS; KASSAM, 1979; JENSEN, 1968; MINHAS et al., 1974). Este fator de resposta de rendimento da cultura ao estresse hídrico pode ser estimado por meio de modelos matemáticos do tipo multiplicativo (JENSEN, 1968; MINHAS et al., 1974) ou aditivo (STEWART et al., 1977).

Estudos avaliando a relação entre a quantidade de água aplicada e rendimento da cultura foi realizado por vários pesquisadores no mundo (GARG; DADHICH, 2014; ZHANG et al., 2018; FOSTER; BROZOVIĆ, 2018; TROUT; DEJONGE, 2017). Pesquisas anteriores (STEWART et al. 1977; TANNER; SINCLAIR 1983; HANKS 1983; DOORENBOS; KASSAM, 1986; STEDUTO et al., 2007) mostraram uma relação linear entre o consumo de água das culturas e seu rendimento final. Vários modelos foram desenvolvidos visando avaliar a redução no rendimento devido ao estresse hídrico (STEDUTO et al., 2009; KANDIL et al., 1995; VAN DIEPEN et al., 1989). Alguns trabalhos foram desenvolvidos para avaliar a redução no rendimento devido ao déficit hídrico (GIULIANI et al., 2018; LOVELLI et al., 2007; LIU et al., 2013; PAREDES et al., 2014; ADEKALU; OKUNADE, 2008), mas pouco se tem feito para as condições da região do Cerrado brasileiro e menos ainda se tem feito para avaliar a resposta do rendimento ao déficit hídrico das novas cultivares de soja que são lançadas anualmente no mercado brasileiro.

O presente trabalho objetivou: (i) estimar o fator de resposta de rendimento da cultura de uma nova cultivar de soja (BRS 7581RR) submetida a déficits hídricos aplicados por estágio de desenvolvimento; (ii) estimar a produtividade de uso de água e a relação entre evapotranspiração atual, irrigação e rendimento da cultura de soja BRS 7581RR submetida a déficits hídricos em diferentes estádios de crescimento.

2.4.2 Material e métodos

2.4.2.1 Área de estudo

Os experimentos foram conduzidos de maio a agosto e de outubro a dezembro de 2019 com a cultura da soja cultivar BRS 7581RR (tipo indeterminado). Os experimentos foram instalados na Unidade de Referência em Manejo de Água (URMA) do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Embrapa Cerrados), localizada na região do Planalto Central do Bioma Cerrado (15°35'55,1"S, 47°42'27,4"W).

O clima da região é classificado como Aw (KÖPPEN, 1948), com temperatura média do ar igual a 22°C e precipitação pluvial de 1.500 mm ano⁻¹, sendo concentrada entre os meses de outubro a março (MALAQUIAS et al., 2010). O solo da área é classificado como Latossolo vermelho, contendo 58% de argila.

Os dados meteorológicos necessários para execução do trabalho foram obtidos de uma estação climatológica localizada a aproximadamente 2 km do experimento. A evapotranspiração de referência foi calculada pela equação FAO-Penman Monteith (ALLEN et al., 1998).

A irrigação foi realizada por meio de um sistema de irrigação por gotejamento enterrado. O sistema consistia de mangueira gotejadora lateral, enterrada a 28 cm, e emissores espaçados de 0,9 m x 0,4 m, com pressão inicial dos emissores de 20 mca e vazão de 2 L h⁻¹.

2.4.2.2 Manejo da cultura

As sementes da cultura foram semeadas com espaçamento de 0,5 m entre linhas e 18 plantas por metro linear, visando atingir a densidade de 360.000 plantas por hectare. A adubação foi feita no sulco de semeadura nas seguintes quantidades: 22,5 kg de N; 112,5 kg de P₂O₅ e 112,5 kg de K₂O por hectare, com base na análise química do solo e seguindo recomendações de Sousa e Lobato (2004). A semeadura do experimento 1 ocorreu em 06/05/2019 e a colheita em 09/08/2019. O segundo experimento (experimento 2), utilizado para a validação das funções de produção, foi semeado em 09/09/2019 e colhido em 25/12/2019.

2.4.2.3 Delineamento experimental

Os experimentos foram conduzidos no delineamento de blocos casualizados, com cinco tratamentos e quatro repetições, totalizando vinte parcelas experimentais. As áreas dos tratamentos tinham dimensões de 9 m x 20 m e as áreas avaliadas em cada tratamento possuíram dimensões de 4 m x 2 m.

No tratamento controle (SE), não foi aplicado déficit hídrico, ou seja, a irrigação foi manejada de forma a suprir toda a demanda hídrica da cultura, visando sempre elevar o solo a capacidade de campo, em todos os seus estádios de desenvolvimento. Nos demais experimentos, onde foram aplicados déficits hídricos, a irrigação foi totalmente suspensa em determinados estádios de desenvolvimento da cultura. A irrigação foi suspensa apenas durante o período de duração do estágio. Finalizado o estágio fenológico, o déficit hídrico foi interrompido e a irrigação retomada conforme o tratamento controle. Para fins de avaliação do déficit hídrico, os seguintes estádios fenológicos foram considerados: VC-V4 (TI); V5-R1 (TII); R1-R5 (TIII); e R5-R7 (TIV). Por exemplo, no tratamento TI, a irrigação foi suspensa do início do estágio fenológico VC ao início do estágio V5.

As fases fenológicas da cultura foram identificadas por meio de avaliação morfológica da planta no campo e pela medição da porcentagem de cobertura vegetal. Para a avaliação da cobertura vegetal, foram obtidas imagens fotográficas do início e final de cada estágio correspondente aos tratamentos, obtendo-se assim, 10 imagens no experimento 1 e 10 imagens no experimento 2, por meio de um smartphone posicionado a 60 cm de altura do dossel, de uma área delimitada por uma moldura de 1m² em cada parcela experimental. A imagem obtida foi ajustada a moldura e processada por meio do aplicativo mobile Canopeo (PATRIGNANI; OCHSNER 2015).

2.4.2.4 Manejo da irrigação e medição da umidade do solo

A lâmina de irrigação aplicada foi calculada com base no valor da umidade atual do solo em cada tratamento, por meio da Equação 1.

$$LA = \frac{0,1 (\theta_{CC} - \theta_{atual})}{Ef} Ds Z \quad (1)$$

em que

- LA = lâmina de irrigação aplicada, mm;
- θ_{CC} = umidade do solo na capacidade de campo, %;
- θ_{atual} = umidade atual do solo em cada tratamento, %;
- Ds = densidade global do solo, g cm⁻³;
- Z = profundidade do sistema radicular da cultura, cm;
- Ef = Eficiência do sistema de irrigação (Ef = 0,90).

A profundidade do sistema radicular da cultura foi avaliada semanalmente em cada tratamento. Para isto, retirava-se aleatoriamente três plantas na área de cada unidade experimental e media-se o comprimento máximo da raiz. A irrigação era

aplicada quando a umidade do solo medida na zona radicular atingia 50% da água total disponível no solo. A umidade do solo foi determinada por meio do método gravimétrico. Amostras de solo foram retiradas diariamente nas camadas de 0-20 e 20-40 cm em cada parcela experimental, pesadas e posteriormente levadas para serem secas em estufa à 105 °C por 24h. Após a secagem, as amostras de solo eram novamente pesadas. Após obtenção do peso úmido e seco do solo, obtinha-se a umidade atual do solo e procedia-se os cálculos da lâmina de irrigação a ser aplicada em cada tratamento.

2.4.2.5 Cálculo da evapotranspiração atual

A evapotranspiração atual da cultura (ET_a), em mm d⁻¹, foi calculada por meio da Equação 2 e 3.

$$ET_a = 10 [(\theta_{1i\ 0-20cm} - \theta_{2i-1\ 0-20cm}) D_i], \text{ para } Z_i \leq 20 \text{ cm} \quad (2)$$

$$ET_a = 10 [(\theta_{1i\ 0-20cm} - \theta_{2i-1\ 0-20cm}) D_i + (\theta_{1i\ 20-40cm} - \theta_{2i-1\ 20-40cm}) D_i], \text{ para } Z_i > 20 \text{ cm} \quad (3)$$

em que

- θ_{1i} = umidade volumétrica no momento da primeira amostragem, m³ m⁻³;
- θ_{2i} = umidade volumétrica no momento da segunda amostragem, m³ m⁻³;
- D_i = espessura da camada (20 cm).

2.4.2.6 Rendimento de grãos

Para avaliação do rendimento de grãos, foi selecionada aleatoriamente uma área em cada uma das quatro repetições e coletadas todas as plantas existentes em 2 metros lineares. As vagens de cada planta foram debulhadas e os grãos foram acondicionados em sacos de papel devidamente identificados e encaminhados para o laboratório de análises de sementes, onde foram pesados em balança analítica, e após a correção da umidade do grão para 13%, o rendimento foi determinado em cada tratamento. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, e as médias foram comparadas utilizando-se o teste de Tukey, adotando-se o nível de 5% de probabilidade.

2.4.2.7 Estimativa do fator de resposta de rendimento da cultura

Foram estimados os fatores de resposta de rendimento da cultura das funções de produção de Jensen et al., 1968, de Minhas et al., 1974 e de Stewart et al., 1977, calculados pelas equações 4, 5 e 6, respectivamente. Os dados de rendimento e

evapotranspiração atual foram obtidos no experimento 1. Os fatores de resposta de cada equação foram calculados parametrizando-se as equações por meio do método do Gradiente Reduzido Generalizado (LASDON et al., 1974).

$$\left(\frac{Y_a}{Y_m}\right) = \left(\frac{ET_{aI}}{ET_{mI}}\right)^{\lambda_I} \left(\frac{ET_{aII}}{ET_{mII}}\right)^{\lambda_{II}} \left(\frac{ET_{aIII}}{ET_{mIII}}\right)^{\lambda_{III}} \left(\frac{ET_{aIV}}{ET_{mIV}}\right)^{\lambda_{IV}} \quad (4)$$

$$\left(\frac{Y_a}{Y_m}\right) = \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{aI}}{ET_{mI}}\right)^2\right)^{\delta_I} \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{aII}}{ET_{mII}}\right)^2\right)^{\delta_{II}} \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{aIII}}{ET_{mIII}}\right)^2\right)^{\delta_{III}} \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{aIV}}{ET_{mIV}}\right)^2\right)^{\delta_{IV}} \quad (5)$$

$$\left(\frac{Y_a}{Y_m}\right) = \left(1 - K_{yI} \left(1 - \frac{ET_{aI}}{ET_m}\right)_I\right) + \left(1 - K_{yII} \left(1 - \frac{ET_{aI}}{ET_m}\right)_{II}\right) + \left(1 - K_{yIII} \left(1 - \frac{ET_{aI}}{ET_m}\right)_{III}\right) + \left(1 - K_{yIV} \left(1 - \frac{ET_{aI}}{ET_m}\right)_{IV}\right) \quad (6)$$

em que

I, II, III, IV = índice referente ao estágio de desenvolvimento em que a cultura se encontra (VC-V4; V5-R1; R1-R5; e R5-R7);

λ = índice de sensibilidade ao estresse em função do déficit de umidade do solo de Jensen para os estádios de desenvolvimento I, II, III ou IV;

δ = índice de sensibilidade ao estresse em função do déficit de umidade do solo de Minhas para os estádios de desenvolvimento I, II, III ou IV;

K_y = fator de redução de rendimento baseado em déficit de umidade do solo de Stewart para os estádios de crescimento I, II, III ou IV;

ET_a = Evapotranspiração atual total ocorrida no estágio de desenvolvimento da cultura I, II, III ou IV;

ET_m = Evapotranspiração atual máxima total ocorrida no estágio de desenvolvimento da cultura I, II, III ou IV;

Y_a = rendimento atual da cultura, kg ha⁻¹, obtidos ao final do ciclo no tratamento submetido ao déficit hídrico;

Y_m = rendimento máximo da cultura, kg ha⁻¹, obtidos ao final do ciclo no tratamento sem déficit hídrico.

2.4.2.8 Avaliação dos desempenhos das funções de produção

Para avaliar o desempenho das funções de produção, as equações 3, 4 e 5, com os coeficientes λ , δ e K_y , obtidos no experimento 1, foram utilizadas para simular o rendimento da cultura em cada tratamento do experimento 2. O rendimento simulado foi comparado ao rendimento observado em campo.

Os desempenhos das equações desenvolvidas foram avaliados por meio da média do erro absoluto (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), eficiência do modelo de Nash-Sutcliffe (EF) e coeficiente de determinação (r^2). Os indicadores foram calculados pelas equações 7, 8, 9 e 10.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (7)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (8)$$

$$\text{EF} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

$$r^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)(O_i - \bar{O}_i))^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

em que

O_i = valor observado no experimento em campo da ordem i ;

\bar{O} = média dos valores observados;

P_i = valores simulados pelos modelos da ordem i ;

\bar{P}_i = média dos valores simulados;

n = número de observações.

2.4.2.9 Produtividade de uso da água

A produtividade de uso de água foi calculada em cada experimento e tratamento, em kg m^{-3} , em função da evapotranspiração atual total (PUA) conforme Equação 11, proposta por Payero et al. (2009).

$$\text{PUA} = \frac{Y_a}{\text{ETa}} \quad (11)$$

2.4.3 Resultados

2.4.3.1 Avaliação dos dados climáticos observados

Na Figura 2.4.1 apresenta-se uma síntese dos dados climáticos observados durante a duração dos experimentos 1 e 2.

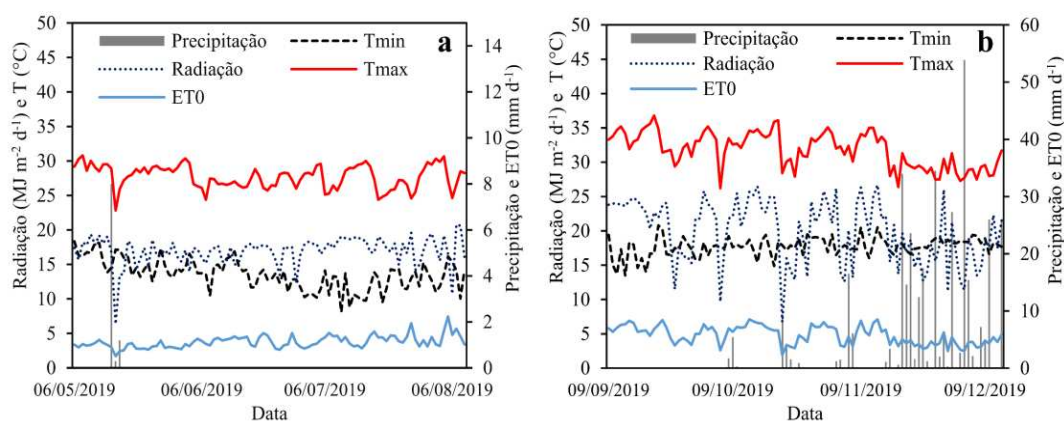


Figura 2.4.1. Temperaturas máxima (Tmax) e mínima (Tmin) do ar, radiação solar, precipitação e evapotranspiração de referência (ET0) ocorridas nos experimentos 1 (a) e 2 (b) durante o cultivo de soja.

Durante o experimento 1, foram observados três eventos chuvosos, ocorridos logo após o plantio da cultura, antes da emergência da planta, totalizando 9,5 mm. No experimento 2, foram observados 47 eventos chuvosos, com o primeiro evento ocorrido 10 dias após a emergência da cultura, e maiores frequências de precipitação a partir dos 71 dias após o plantio, totalizando 417,5 mm. No experimento 1, a ET_0 variou de 1,7 a 7,4 mm d^{-1} , atingindo seu valor máximo no mês de agosto. No experimento 2, os valores de ET_0 variaram de 1,9 a 7,1 mm d^{-1} . A temperatura média do ar variou de 16,9 a 23,2 °C no experimento 1 e de 20,4 a 28,1 °C no experimento 2. A radiação solar variou de 6,4 a 20,8 MJ $m^{-2} d^{-1}$ no experimento 1, sendo o maior valor observado no mês de agosto; já no experimento 2, a radiação variou de 6,7 a 27,0 MJ $m^{-2} d^{-1}$, com maior valor encontrado no mês de dezembro. A média de horas de luz durante o experimento 2 foi de 9 h d^{-1} e no experimento 1 foi de 7 h d^{-1} .

2.4.3.2 Evapotranspiração atual

Na Figura 2.4.2 apresenta-se os valores observados de evapotranspiração atual acumulada referente a cada estágio de desenvolvimento da soja nos experimentos 1 e 2, respectivamente.

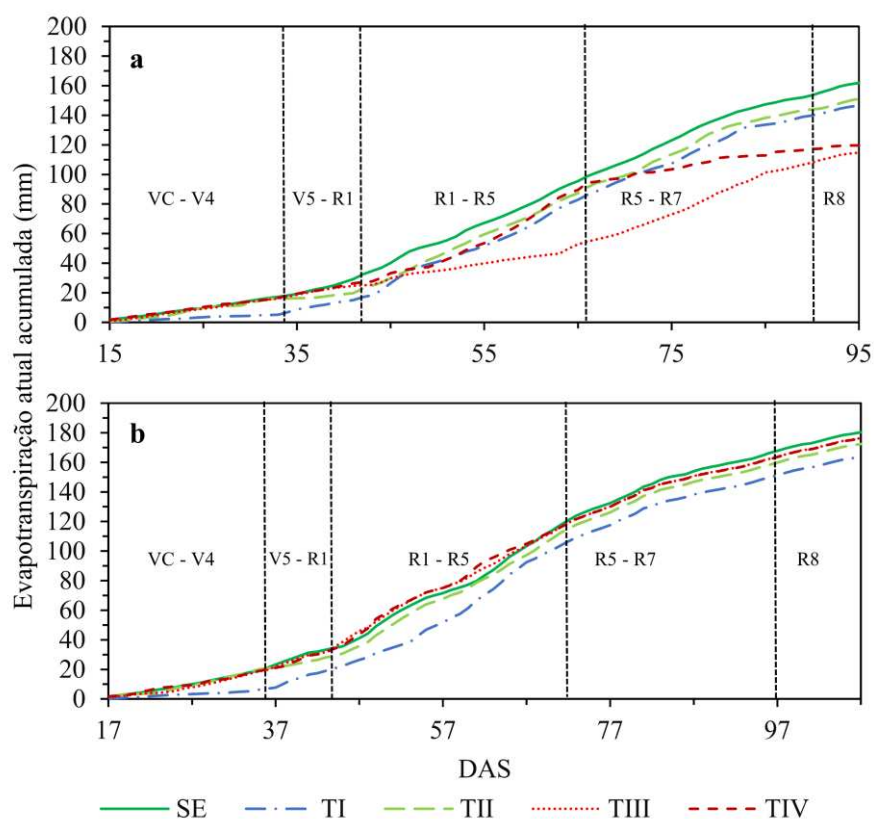


Figura 2.4.2. Evapotranspiração atual acumulada da soja, cultivada com déficit hídrico aplicado nos estádios de desenvolvimento (VC-V4 = cotilédone até o quarto nó; V5-R1 = quinto nó até o início do florescimento; R1-R5 = início do florescimento

até o início do enchimento de grãos; R5-R7 = início do enchimento de grãos até o início da maturação fisiológica; R8 = maturidade total) em função dos dias após a semeadura nos experimentos 1 (a) e 2 (b). SE = sem déficit hídrico; TI = déficit hídrico aplicado no estádio VC-V4; TII = déficit hídrico aplicado no estádio V5-R1; TIII = déficit hídrico aplicado no estádio R1-R5; TIV = déficit hídrico aplicado no estádio R5-R7.

Observou-se que a demanda hídrica da cultura foi menor nos estádios vegetativos (VC-V4 e V5-R1) com tendência a aumentar nos estádios reprodutivos (R1-R5 e R5-R7). Os menores valores de ETa foram observados no estádio V5-R1, e os maiores no estádio R1-R5 no tratamento sem déficit hídrico (SE), tendo este comportamento ocorrido nos dois experimentos.

No experimento 1, a evapotranspiração média diária observada em cada estádio do tratamento SE foi 0,9 mm d⁻¹ (VC-V4), 1,2 mm d⁻¹ (V5-R1), 2,7 mm d⁻¹ (R1-R5) e 2,5 mm d⁻¹ (R5-R7), atingindo valor de evapotranspiração acumulada igual a 161,8 mm. Nos tratamentos em que foram aplicados os déficits hídricos, o maior valor de ETa acumulada foi verificado no tratamento TII (151,1 mm). Os tratamentos TI, TIII e TIV apresentaram valores de ETa acumulados iguais a 146,6, 114,7 e 119,7 mm, respectivamente. Os valores de evapotranspiração diária durante os períodos com déficit hídrico foram iguais a 0,3 mm d⁻¹ (TI), 0,8 mm d⁻¹ (TII), 1,0 mm d⁻¹ (TIII) e 1,3 mm d⁻¹ (TIV).

No experimento 2, a ETa acumulada observada foi igual a 180,3 mm, sendo 1,0 mm d⁻¹ (VC-V4), 1,8 mm d⁻¹ (V5-R1), 3,0 mm d⁻¹ (R1-R5) e 2,0 mm d⁻¹ (R5-R7). Entre os tratamentos com déficit hídrico, não se observou grande diferença entre os valores de ETa para os tratamentos TII, TIII e TIV, sendo que o menor valor de ETa foi obtido no tratamento TI, com valor acumulado de 163,8 mm. Os valores de evapotranspiração média diária durante os períodos com déficit hídrico foram 0,3 mm d⁻¹, 1,0 mm d⁻¹, 3,0 mm d⁻¹ e 1,8 mm d⁻¹, para os tratamentos TI, TII, TIII e TIV, respectivamente.

2.4.3.3 Rendimento de grãos

Na Tabela 2.4.1 apresenta-se o rendimento de grãos obtidas nos experimentos 1 e 2 para os diferentes tratamentos. Observou-se que houve diferença estatística no rendimento observado nos tratamentos nos dois experimentos ($p < 0,05$).

Tabela 2.4.1. Rendimento médio de grãos de soja nos diferentes tratamentos, com e sem déficit hídrico, nos experimentos 1 e 2

| Tratamento | Rendimento (kg ha ⁻¹) | |
|------------|-----------------------------------|---------------|
| | experimento 1 | experimento 2 |
| SE | 3153,5a | 5576,5a |
| TI | 2522,8b | 4008,8c |
| TII | 2677,8b | 4963,5b |
| TIII | 1985,6c | 4957,8b |
| TIV | 2143,3c | 5223,3b |

Letras diferentes nas colunas indicam diferenças significativas de acordo com o teste de Tukey ($p < 0,05$). SE = tratamento controle (sem déficit hídrico); TI = déficit hídrico aplicado no estágio VC-V4; TII = déficit hídrico aplicado no estágio V5-R1; TIII = déficit hídrico aplicado no estágio R1-R5; TIV = déficit hídrico aplicado no estágio R5-R7.

No experimento 1, o maior rendimento foi obtido no tratamento sem déficit hídrico. Embora tenha sido observadas reduções nos rendimentos da cultura nos tratamentos TI, TII, TIII e TIV iguais a 20, 15, 37 e 32% respectivamente, não foram observadas diferenças estatísticas entre os rendimentos obtidos nos tratamentos TI e TII e nem entre TIII e TIV. No experimento 2, o maior rendimento foi observado no tratamento SE. Não foram observadas diferenças estatísticas entre os rendimentos obtidos nos tratamentos TII, TIII e TIV, sendo estes menores em 11%, 11% e 6,3% respectivamente. No caso do tratamento TI, nota-se que houve uma redução de 28,1% no rendimento quando comparado ao rendimento obtido no tratamento SE. Os rendimentos observados nos tratamentos SE, TI, TII, TIII e TIV do experimento 1 foram 43,4%, 37%, 46%, 60% e 59% menores que os observados nos mesmos tratamentos no experimento 2.

2.4.3.4 Produtividade de uso da água e relações entre rendimento, irrigação total aplicada e evapotranspiração atual

Na Figura 2.4.3 apresenta-se a produtividade de uso da água (PUA) obtidas nos experimentos 1 e 2 para os diferentes tratamentos. Observa-se que houve diferença estatística entre os tratamentos nos dois experimentos ($p < 0,05$).

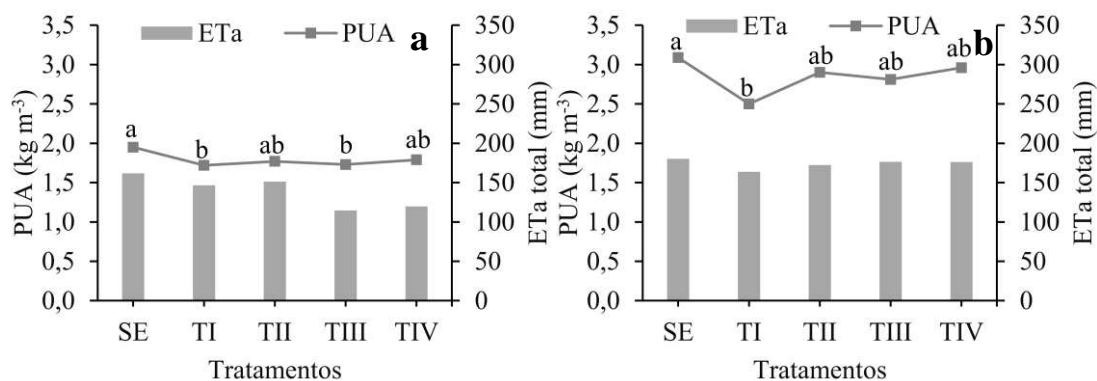


Figura 2.4.3. Produtividade de uso da água da soja cultivada com déficit hídrico aplicado em diferentes estádios de desenvolvimento nos experimentos 1 (a) e 2 (b). SE = sem déficit hídrico; TI = déficit hídrico aplicado no estágio VC-V4; TII = déficit hídrico aplicado no estágio V5-R1; TIII = déficit hídrico aplicado no estágio R1-R5; TIV = déficit hídrico aplicado no estágio R5-R7. Letras diferentes na barra de cada tratamento representam diferenças significativas entre os tratamentos após ANOVA (teste de Tukey, $p < 0,05$).

No experimento 1, o maior valor de PUA foi obtido no tratamento SE (Figura 2.4.3a). Entre os tratamentos com déficit hídrico, os maiores valores de PUA foram observados nos tratamentos TII e TIV, que foram estatisticamente iguais ao tratamento SE. Os valores de PUA observados nos tratamentos TI e TIII foram estatisticamente iguais, com valores 11,8% e 11,3% menores que os observados no tratamento SE. TI e TIII foram estatisticamente iguais aos tratamentos TII e TIV. No experimento 2, o maior valor de PUA foi observado no tratamento SE (Figura 2.4.3b). O tratamento TI apresentou valor 19% menor que o tratamento SE, e os tratamentos TII, TIII e TIV foram estatisticamente iguais ao tratamento SE.

As relações entre o rendimento, evapotranspiração atual e irrigação aplicada durante o ciclo da soja nos experimentos 1 e 2 estão apresentadas na Figura 2.4.4.

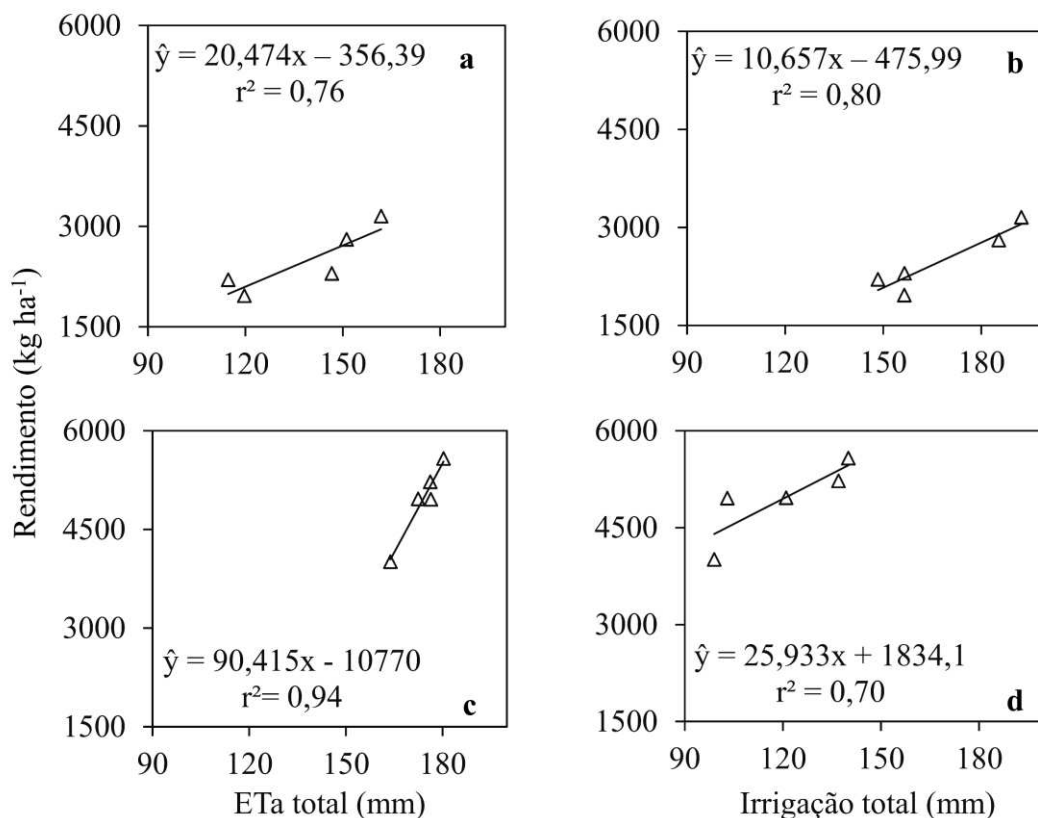


Figura 2.4.4. Relação entre o rendimento, evapotranspiração atual (ETa) e irrigação total para o experimento 1 (a e b) e 2 (c e d).

No experimento 1, observou-se uma relação linear entre o rendimento e a evapotranspiração atual total ocorrida no ciclo (Figura 2.4.4a), com valor de r^2 de 0,76. O mesmo comportamento foi observado para a relação entre o rendimento e a irrigação total aplicada, com r^2 de 0,80 (Figura 2.4.4b). No experimento 2, observou-se uma forte correlação linear entre o rendimento e a ETa, com r^2 igual a 0,94 (Figura 2.4.4c). O mesmo comportamento foi observado para a relação entre o rendimento e a irrigação total aplicada, com r^2 de 0,70 (Figura 2.4.4d).

2.4.3.5 Fator de resposta de rendimento da cultura ao déficit hídrico

Na Tabela 2.4.2 apresenta-se os valores do fator de resposta de rendimento da cultura ao estresse hídrico por estágio de desenvolvimento (K_y , λ , δ) obtidos no experimento 1. Em todos os modelos, os maiores valores para o fator de resposta foram observados no estágio R5-R7.

Tabela 2.4.2. Valores de fatores de resposta de rendimento de Stewart. 1977, Jensen et al., 1968 e Minhas et al., 1974, para a soja sob déficit hídrico em diferentes estádios de desenvolvimento.

| Tratamentos | Fatores de resposta de rendimento ao estresse hídrico | | |
|-------------|---|--------|--------|
| | Stewart | Jensen | Minhas |
| I (VC-V4) | 0,32 | 0,21 | 0,22 |
| II (V5-R1) | 0,25 | 0,14 | 0,16 |
| III (R1-R5) | 0,63 | 0,43 | 0,42 |
| IV (R5-R7) | 0,75 | 0,56 | 0,44 |

2.4.3.6 Avaliação dos modelos de estimativa de rendimento

Na Figura 2.4.5 apresenta-se as estimativas dos rendimentos atuais simulado em função do rendimento observado para os três modelos estudados. Observa-se um bom desempenho dos modelos ($r^2 > 0,9$) nas estimativas de rendimento da cultura da soja.

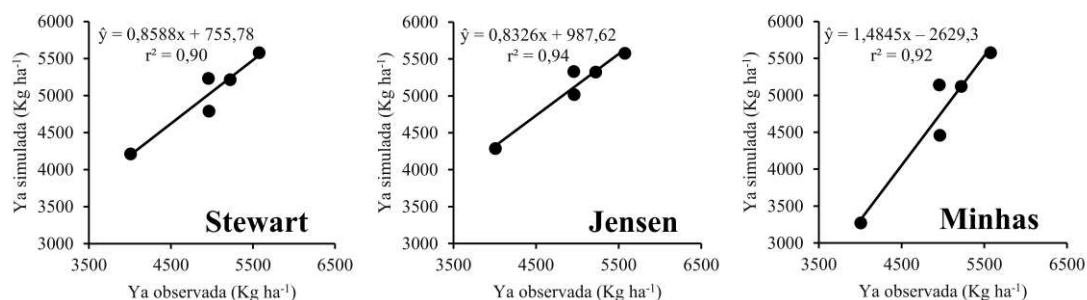


Figura 2.4.5. Rendimento atual (Ya) observado e simulado pelo modelo de Stewart 1977, Jensen et al., 1968 e Minhas et al., 1974.

Comparando-se os dados de rendimento atual observados e simulados, verificou-se que o modelo de Stewart superestimou a Ya em cerca de 5,0% e 5,5%, nos tratamentos TI e TIII, respectivamente. Esse mesmo modelo subestimou os valores de Ya em 3,5% e 0,2% nos tratamentos TII e TIV, com MAE e RMSE iguais a 132 e 170,6 kg ha⁻¹, respectivamente, e eficiência do modelo de 89%. O modelo de Jensen subestimou a Ya nos tratamentos TI, TII, TIII e TIV em 7,0, 1,0, 7,5 e 2,0%, respectivamente, com MAE e RMSE iguais a 159,7 e 213,2 kg ha⁻¹ e eficiência de 83%. Já o modelo de Minhas superestimou o rendimento atual em 18,4, 10,2 e 1,3% nos tratamentos TI, TII e TIV, respectivamente e subestimou em 3,7% no tratamento TIII. Este modelo foi o que apresentou o pior desempenho com MAE e RMSE iguais a 306,4 e 411,2 kg ha⁻¹ e eficiência igual a 37%.

2.4.4 Discussão

Nos experimentos 1 e 2, observou-se que, nos estádios vegetativos (VC-V4 e V5-R1) de todos os tratamentos, os valores de ETa foram menores que nos demais estádios, esse comportamento pode ser explicado pela baixa demanda hídrica da cultura nesses estádios, havendo um aumento da demanda, devido ao rápido crescimento vegetativo, a partir do estádio R1 (ANAPALLI et al., 2018; WEI et al., 2018).

Embora em magnitudes diferentes, o rendimento da soja foi influenciado significativamente ($p < 0,05$) pelo déficit hídrico aplicado em cada estádio de desenvolvimento. No experimento 1, o menor rendimento foi observado nos tratamentos TIII e TIV. Nesses tratamentos, no momento de aplicação do déficit hídrico, as plantas se encontravam nos estádios de formação de vagem e enchimento de grãos, respectivamente. Durante esses estádios de desenvolvimento, a cultura é muito sensível ao estresse hídrico. Além disso, outro fator que pode ter contribuído para o menor rendimento foi que esses estádios tiveram duração de tempo maior que os demais, conseqüentemente a cultura permaneceu mais tempo em déficit hídrico nesses tratamentos (23 e 24 dias, respectivamente). Quanto maior a intensidade do estresse hídrico, maior é o comprometimento das funções metabólicas da cultura correlacionadas com a diminuição do ATP (PARRY et al. 2002) que ocorre devido à redução do transporte de elétrons e fotofosforilação (CATUCHI et al. 2011). Além disso, em condições de déficit hídrico o tilacóide pode ter sofrido danos estruturais causados pela diminuição do teor de água (LAWLOR e CORNIC 2002), levando a redução da eficiência do aparelho fotossintético das plantas, causando a redução do rendimento. Pejić et al. (2011) também observaram que a soja é mais sensível ao déficit hídrico no estádio de formação de vagens e enchimento de grãos. Vários autores observaram uma forte redução no rendimento quando o déficit hídrico ocorreu naqueles estádios (MIMI et al., 2016; HE et al., 2017; WIJewardana et al., 2018; KUNERT et al., 2016). Nos tratamentos TI (VC-V4) e TII (V5-R1), observou-se uma redução de 20% e 15%, respectivamente, no rendimento da cultura quando comparada ao tratamento sem déficit hídrico.

No experimento 2, o menor rendimento foi observado no tratamento TI. Nos tratamentos TII, TIII e TIV, apesar de ter apresentado diferença estatística, os valores de rendimento variaram entre 6,3% e 11%, valores estes que são considerados pequenos, pois ainda assim os tratamentos possuíam 90% da produtividade total.

Deste modo, pode-se dizer que o déficit hídrico aplicado não foi suficiente para influenciar no rendimento da cultura, e justifica-se pelo fato de ter ocorrido chuvas.

No experimento 1, observou-se no tratamento SE um rendimento máximo de 3153,5 kg ha⁻¹ e, no experimento 2, de 5576,5 kg ha⁻¹, diferença percentual de 43,4%. Essa diferença pode ser atribuída as condições climáticas, principalmente na quantidade de horas de luz e temperatura máxima do ar, que exercem grande influência no desenvolvimento da cultura da soja (FARIAS et al., 2007; FERREIRA et al., 2007; KANTOLIC, 2008; SOUZA et al., 2013). No experimento 2, observou-se temperatura máxima média de 31,6°C, cerca de 12,3% maior que no experimento 1 e a quantidade média de radiação por dia de 19,9 MJ m⁻² d⁻¹, valor cerca de 14,9 % maior que no experimento 1. Além disso, no experimento 1 a média diária de horas de luz foi de 7 h d⁻¹, valor 24% menor que o observado no experimento 2.

Tanto no experimento 1 como no 2 não foram notadas diferenças estatísticas entre os valores de PUA obtidos nos tratamentos SE, TII e TIV. Uma possível explicação para esse resultado é a pequena duração do estágio V5-R1 (TII), 7 dias tanto no experimento 1 como no 2. Consequentemente a duração do déficit hídrico foi também pequena, reduzindo o seu impacto na ETa acumulada e no rendimento. No caso do estágio R5-R7 (TIV) uma possível explicação para o valor elevado de PUA é que quando o estresse hídrico foi aplicado, embora a planta se encontrasse no estágio de enchimento de grãos, estágio importante para garantir o rendimento final, a planta já tinha desenvolvido todas as suas características vegetativas e, portanto, pôde se recuperar do estresse. Isto é, a redução no rendimento foi proporcionalmente menor que a redução na demanda de água.

Uma maior redução no valor da PUA foi observada quando o déficit hídrico foi aplicado nos estádios VC-V4 (TI) e R1-R5 (TIII). Isso pode ser explicado pelo fato de que durante o estágio de desenvolvimento VC-V4 a planta está em constante desenvolvimento, ou seja, em pleno processo de divisão celular. O estágio R1-R5 compreende todo o período de florescimento e formação de vagem, sendo estes estádios tidos como os mais críticos para a formação da produção da cultura. Neste estágio, a redução do rendimento foi proporcionalmente maior que a redução na demanda de água, refletindo na redução do valor da PUA.

As relações entre ETa, irrigação total e rendimento apresentaram comportamento linear. Nos experimentos 1 e 2, observou-se uma forte relação entre o rendimento e a evapotranspiração total ocorrida no ciclo da cultura com $r^2 = 0,76$ e r^2

= 0,94, respectivamente (Figuras 2.4.4a e 2.4.4c). Estes resultados indicam que a cada 1 mm que é incrementado na ETa foi gerado um incremento no rendimento de 20,5 kg ha⁻¹ e de 90,4 kg ha⁻¹ nos experimentos 1 e 2, respectivamente. Comportamento semelhante foi também observado em estudo realizado por Zhang et al. (2018), Payero et al. (2005) e Karam et al. (2005).

As relações obtidas entre rendimento e irrigação apresentaram comportamento semelhante ao observado para ETa. Observou-se correlação linear com valores de $r^2 = 0,80$ e $r^2 = 0,70$ para os experimentos 1 e 2, respectivamente (Figura 2.4.4b e 2.4.4d). Comportamento similar foi observado por Irmak et al. (2014). Esse resultado indica a importância da irrigação para a cultura da soja na região do Cerrado que apresenta constantes eventos de veranicos que podem comprometer grande parte da produção.

Os fatores de sensibilidade ao estresse hídrico observados no experimento 1 variaram em magnitude em função do modelo utilizado. Para todos os modelos, os maiores valores de coeficiente foram observados nos tratamentos TIII e TIV, indicando que a cultura é mais sensível ao estresse hídrico nos estádios R1-R5 e R5-R7. Estes estádios são considerados os mais importantes para a formação da produção, pois engloba o florescimento e a formação e o enchimento de vagens. Fu et al., 2019, observaram que os maiores valores de fator de rendimento de Jensen foram encontrados para a soja quando o déficit hídrico foi aplicado no estádio de formação e enchimento de vagens.

A cultura nos estádios VC-V4 (TI) e V5-R1 (TII) foi menos sensível ao déficit hídrico, apresentando os menores valores de fator de rendimento em todos os modelos avaliados. Esse comportamento pode ser constatado também analisando-se os dados observados de rendimento e ETa. Por exemplo, no estádio R1-R5 a cultura ficou 24 dias sem ser irrigada, o que provocou uma diminuição de 29,1% na ETa, quando comparada a ETm, e uma redução no rendimento de 37%. Já, quando a cultura se encontrava no estádio VC-V4, ela ficou 19 dias sem ser irrigada, o que provocou uma redução de 9,4% na ETa, quando comparada a ETm, e uma redução no rendimento de 20 %.

O modelo de Minhas superestimou o rendimento atual da cultura da soja em 10,2% em média. As funções de produção de Stewart e Jensen apresentaram um bom desempenho na estimativa dos rendimentos, com baixos valores de MAE e RMSE, boa correlação entre os valores de rendimento observado e simulado e boa eficiência. Já o modelo de Minhas apresentou valores elevados de MAE e RMSE, quando

comparado aos outros modelos, porém observou-se alta correlação entre os dados observados e simulados. Portanto, comparando-se as métricas e os resultados dos modelos estudados, constata-se que o modelo de Stewart e Jensen apresentaram melhores desempenhos que o modelo de Minhas et al. (1974) para estimar o rendimento atual em função da evapotranspiração atual. Este comportamento também foi observado por Igbadun et al. (2007) quando comparou modelos de funções de produção para a predição do rendimento do milho em função da evapotranspiração atual, mostrando que o modelo de Minhas et al. (1974) não teve bom desempenho nas estimativas.

Alguns dos estádios de desenvolvimento estudados neste trabalho foram diferentes daqueles realizados em outros trabalhos (MONDANI et al. 2019; KARAM et al. 2005). As durações dos estádios estudados também foram diferentes. Os estádios avaliados neste trabalho foram escolhidos em função da sua importância para a formação da produção final da cultura da soja.

Os trabalhos de melhoramento genético trazem algumas especificidades às culturas, como, por exemplo, maior resistência a pragas e doenças, como é o caso da cultivar BRS 7581RR. Doorenbos e Kassam (1979), sugeriram valores de fatores de rendimento para os estádios inicial, desenvolvimento e médio para a soja, iguais a 0,2, 0,8 e 1,0. No presente trabalho, estes estádios corresponderam a VC-V4, V5-R1 (inicial), desenvolvimento (R1-R5) e médio (R5-R7). Comparando-se com os valores propostos por Doorenbos e Kassam (1979), o modelo de Stewart. 1977 apresentou valor maior em 50% no estágio inicial, menores nos estádios de desenvolvimento e médio em 21% e 25%, respectivamente.

Os resultados apresentados indicam a importância de se realizar estudos específicos para cada região e para cada nova cultivar. O comportamento das novas cultivares às diferentes condições edafoclimáticas ainda é desconhecido. Para essas novas cultivares, é importante conhecer como o déficit hídrico impacta o seu rendimento e a produtividade de uso da água. Esses resultados serão cada vez mais importante para o planejamento e gestão de recursos hídricos, considerando a produtividade de uso da água como uma métrica de gestão importante.

2.4.5 Conclusões

A soja estudada apresentou maior sensibilidade ao déficit hídrico nos estádios de desenvolvimento correspondentes ao florescimento até a formação de vagens (R1-R5) e enchimento de grãos (R5-R7).

O déficit hídrico aplicado no estágio de enchimento de grãos não influenciou a produtividade de uso da água da soja estudada. Porém, uma menor produtividade de uso da água foi observada quando o déficit hídrico foi aplicado no estágio inicial da cultura (VC-V4).

Os fatores de rendimento para os modelos e estádios de desenvolvimento da cultura estudados (VC-V4, V5-R1, R1-R5 e R5-R7) foram: Stewart. 1977: 0,32, 0,25, 0,63 e 0,75; Jensen et al., 1968: 0,21, 0,14, 0,43 e 0,46; Minhas et al., 1974: 0,22, 0,16, 0,42 e 0,44.

Os fatores de rendimento obtidos em todos os modelos de produção formam maiores durante os estádios R1-R5 e R5-R7, mostrando a maior sensibilidade da soja nesses estádios.

Os fatores de rendimento de Jensen et al., 1968 e Stewart. 1977 apresentaram os melhores desempenho na estimativa do rendimento da soja sob déficit hídrico.

2.4.6 Referências bibliográficas

ADEKALU, K. O.; OKUNADE, D. A. Evaluation of crop yield models for cowpea in Nigeria. **Irrigation science**, [s.l.], v. 26, n. 5, p. 385-393, 24 jan. 2008.

AGROSATÉLITE. **Análise geoespacial da dinâmica da soja no bioma Cerrado: 2014 a 2017**. Florianópolis: Gtc, 2018. 24 p.

ALLEN, E.; VALDES, C. **Brazil's Corn Industry and the Effect on the Seasonal Pattern of U.S. Corn Exports**. AES-93, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, June 2016.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998.

ALTHOFF D.; RODRIGUES LN. The expansion of center-pivot irrigation in the Cerrado biome. **IRRIGA**, v. 1, n. 1, p. 56-61, 2019.

ANAPALLI, S.S.; FISHER, D.K.; REDDY, K.N.; WAGLE, P.; GOWDA, P.H.; SUI, R. Quantifying soybean evapotranspiration using an eddy covariance approach. **Agricultural Water Management**, v. 209, p. 228-239, 2018.

BEHERA, S.K.; PANDA, R.K. Integrated management of irrigation water and fertilizers for wheat crop using field experiments and simulation modeling. **Agricultural water management**, v. 96, n. 11, p. 1532-1540, 2009.

BRASIL. **Análise territorial para o desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil**. Brasília: MI, 2014, 217 p.

CATUCHI, T. A.; VÍTOLO, H. F.; BERTOLLI, S. C.; SOUZA, G. M. Tolerance to water deficiency between two soybean cultivars: transgenic versus conventional. **Ciência Rural**, v. 41, n. 3, p. 373-378, 2011.

DA SILVA E.H.; GONÇALVES, A.O.; PEREIRA, R.A.; JÚNIOR I.M.F.; SOBENKO, L.R.; MARIN, F.R. Soybean irrigation requirements and canopy-atmosphere coupling in Southern Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 218, p. 1-7, 2019.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. **Yield Response to Water**. Irrigation and Drainage Paper 33. Rome: FAO, 1998. 257 p.

FARIAS, J.R.B.; NEPOMUCENO, A.L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: EMBRAPA, (Circular técnica, 48). 2007.

FERERES, E.; SORIANO, M. A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal Of Experimental Botany**, [s.l.], v. 58, n. 2, p. 147-159, 6 nov. 2006.

FERREIRA, W.P.M.; COSTA, L.C.; SOUZA, C.F. Modelo de estimativa de produtividade de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) em função da variabilidade da temperatura. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 15, n. 4, p. 400-407. 2007.

FAPDA (FOOD AND AGRICULTURE POLICY DECISION ANALYSIS). 2014 **Brazil country fact sheet on food and agriculture policy trends**. [s.l.], FAPDA, 2014. 5 p.

FOSTER, T.; BROZOVIĆ, N. Simulating crop-water production functions using crop growth models to support water policy assessments. **Ecological economics**, v. 152, p. 9-21, 2018.

FU, Q.; YANG, L.; LI, H.; LI, T.; LIU, D.; JI, Y.; LI, M.; ZHANG, Y. Study on the optimization of dry land irrigation schedule in the downstream Songhua River Basin based on the SWAT model. **Water**, v. 11, n. 6, p. 1147, 2019.

GARG, N.K.; DADHICH, S.M. A proposed method to determine yield response factors of different crops under deficit irrigation using inverse formulation approach. **Agricultural Water Management**, v. 137, p. 68-74, 2014.

GEERTS, A.; RAES, D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 96, n. 9, p. 1275-1284, set. 2009.

GIULIANI, M. M.; CARUCCI, F.; NARDELLA, E.; FRANCAVILLA, M.; RICCIARDI, L.; LOTTI, C.; GATTA, G. Combined effects of deficit irrigation and strobilurin application on gas exchange, yield and water use efficiency in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). **Scientia Horticulturae**, [s.l.], v. 233, p. 149-158, mar. 2018.

GREAVES, G. E.; WANG, Y. Yield response, water productivity, and seasonal water production functions for maize under deficit irrigation water management in southern Taiwan. **Plant Production Science**, [s.l.], v. 20, n. 4, p. 353-365, 22 ago. 2017.

HANK, R.J. Yield and water-use relationships: An overview. TAYLOR, H. M.; JORDAN, W. R.; SINCLAIR, T. R. In: **Limitations to efficient water use in crop production**. 393-411. Madison, WI: American Society of Agronomy. 1983.

HE, J.; DU, Y.; WANG, T.; TURNER, N.C.; YANG, R.; JIN, Y.; XI, Y.; ZHANG, C.; CUI, T.; FANG, X. Conserved water use improves the yield performance of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) under drought. **Agricultural Water Management**, v. 179, p. 236-245, 2017.

IGBADUN, H. E.; TARIMO, A. K. P.R.; SALIM, B. A.; MAHOO, H. F. Evaluation of selected crop water production functions for an irrigated maize crop. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 94, n. 1-3, p. 1-10, dez. 2007.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola – dezembro de 2018**. 2018. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/brasil>. Acesso em: 10 jun. 2020.

IRMAK, S.; SPECHT, J. E.; ODHIAMBO, L. O.; REES, J. M.; CASSMAN, K. G. Soybean yield, evapotranspiration, water productivity, and soil water extraction response to subsurface drip irrigation and fertigation. **Transactions of the ASABE**, v. 57, n. 3, p. 729-748, 2014.

JENSEN, M.E. Water consumption by agricultural plants. In: Kozlowski TT. **Water deficits and plant growth, vol 2**. New York: Academic Press, 1968.p. 1–22.

KANDIL, H. M.; SKAGGS, R. W.; DAYEM, S. ABDEL; AIAD, Y. DRAINMOD-S: water management model for irrigated arid lands, crop yield and applications. **Irrigation and Drainage Systems**, [s.l.], v. 9, n. 3, p. 239-258, ago. 1995.

KANTOLIC, A.G. Control ambiental y genético de la fenología del cultivo de soja: impactos sobre el rendimiento y la adaptación de genótipos. **Revista de la Facultad de Agronomía**, Buenos Aires, v. 28, n. 1, p. 63- 88. 2008.

KARAM, F.; MASAAD, R.; SFEIR, T.; MOUNZER, O.; ROUPHAEL, Y. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 75, n. 3, p. 226-244, jul. 2005.

KIPKORIR, E.C.; RAES, D.; MASSAWE, B. Seasonal Water Production Functions and Yield Response Factors for Maize and Onion in Perkerra, Kenya. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 56, n. 3, p. 229-240, ago. 2002.

KIRDA, C. Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance. **Deficit irrigation practices. FAO Water Rep.** 22, 3–10. 2002.

KÖPPEN, W. **Climatología: con un estudio de los climas de la tierra**. Fondo de Cultura Económica. México. 1948. 479p.

KUNERT, K.J.; VORSTER, B.J.; FENTA, B.A.; KIBIDO, T.; DIONISIO, G.; FOYER, C.H. Drought stress responses in soybean roots and nodules. **Frontiers in plant science**, v. 7, p. 1015, 2016.

LAWLOR, D.W.; CORNIC, G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. **Plant, cell & environment**, v. 25, n. 2, p. 275-294, 2002.

LIU, X.; SHAO, L.; SUN, H.; CHEN, S.; ZHANG, X. Responses of yield and water use efficiency to irrigation amount decided by pan evaporation for winter wheat. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 129, p. 173-180, nov. 2013.

LOVELLI, S.; PERNIOLA, M.; FERRARA, A.; DI TOMMASO, T. Yield response factor to water (K_y) and water use efficiency of *Carthamus tinctorius* L. and *Solanum melongena* L. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 92, n. 1-2, p. 73-80, ago. 2007.

MALAQUIAS, J.V.; DA SILVA, F. A.M.; EVANGELISTA, B.A. **Precipitação pluviométrica em Planaltina, DF: análise de dados da estação principal da Embrapa Cerrados, 1974 a 2003**. Embrapa Cerrados-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E). 2010.

MEADE, B.; PURICELLI, E.; MCBRIDE, W.; VALDES, C.; HOFFMAN, L.; FOREMAN, L.; DOHLMAN, E. **Corn and soybean production costs and export competitiveness in Argentina, Brazil, and the United States**. EIB-154, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, June 2016.

MIMI, A.; MANNAN, M.A.; KHALIQ, Q.A.; MIA M.B. Yield Response of Soybean (*Glycine max* L.) Genotypes to Water Deficit Stress. **Bangladesh Agronomy Journal**, v. 19, n. 2, p. 51-60, 2016.

MINHAS, B. S.; PARIKH, K. S.; SRINIVASAN, T. N. Toward the structure of a production function for wheat yields with dated inputs of irrigation water. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 10, n. 3, p. 383-393, jun. 1974.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. Agrostat. Brasília: MAPA, 2020. Disponível em: <<http://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm>>. Acesso em: abril. 2020.

MONDANI, F.; KHANI, K.; HONARMAND, S. J.; SAEIDI, M. Evaluating effects of plant growth-promoting rhizobacteria on the radiation use efficiency and yield of soybean (*Glycine max*) under water deficit stress condition. **Agricultural water management**, v. 213, p. 707-713, 2019.

MUSTAFA, S. M. T.; VANUYTRECHT, E.; HUYSMANS, M. Combined deficit irrigation and soil fertility management on different soil textures to improve wheat yield in drought-prone Bangladesh. **Agricultural Water Management**, v. 191, p. 124-137, 2017.

PAREDES, P.; RODRIGUES, G. C.; ALVES, I.; PEREIRA, L. S. Partitioning evapotranspiration, yield prediction and economic returns of maize under various irrigation management strategies. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 135, p. 27-39, mar. 2014.

PARRY, M.A.; ANDRALOJC, P.J.; KHAN, S.; LEA, P.J.; KEYS, A.J. Rubisco activity: effects of drought stress. **Annals of botany**, v. 89, n. 7, p. 833-839, 2002.

PATRIGNANI, A.; OCHSNER, T.E. Canopeo: A powerful new tool for measuring fractional green canopy cover. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 6, p. 2312-2320, 2015.

PAYERO, J.O.; MELVIN, S.R.; IRMAK, S. Response of soybean to deficit irrigation in the semi-arid environment of west-central Nebraska. **Transactions of the ASAE**, v. 48, n. 6, p. 2189-2203, 2005.

PAYERO, J. O.; TARKALSON, D. D.; IRMAK, S.; DAVISON, D.; PETERSEN, J. L. Effect of timing of a deficit-irrigation allocation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency and dry mass. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 96, n. 10, p. 1387-1397, out. 2009.

PEJIĆ, B.; MAKSIMOVIĆ, L.; CIMPEANU, S.; BUCUR, D.; MILIĆ, S.; ČUPINA, B. Response of soybean to water stress at specific growth stages. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 9, n. 1, p. 280-284, 2011.

RAGAB, R. Constraints and applicability of irrigation scheduling under limited water resources, variable rainfall and saline conditions. In: Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO) (ed.), **Irrigation Scheduling: from Theory to Practice**. Rome (Italy), 1996. pp. 149–165.

RUIZ SÁNCHEZ, M.C.; DOMINGO, R.; CASTEL, J.R (2010). Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain. **Spanish journal of agricultural research**, n. 2, p. 5-20, 2010.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. Planaltina, Embrapa Cerrados. 416p.

SOUZA P.J.O.P.; SOUZA, A.M.L.; SAMPAIO, L.S. Soybean development and thermal requirement under the climatic conditions of Paragominas, Pará state, Brazil. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 56, n. 4, p. 371-375, 2013.

STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E. On the conservative behavior of biomass water productivity. **Irrigation Science**, v. 25, n. 3, p. 189-207, 2007

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 426-437, 2009.

STEWART, J.I.; HAGAN, R.M.; PRUITT, W.O.; HANKS, R.J.; RILEY, J.P.; DANIELSON, R.E.; FRANKLIN, W.T.; JACKSON, E.B. **Optimising crop production through control and water salinity levels**. Utah water research lab. PRWG151-1, Utah State University, Utah Logan. 1977.

TANNER, C.B.; SINCLAIR, T.R. Efficient water use in crop production: Research or re-research?. In: **Limitations to efficient water use in crop production**. p 1-27. Madison, WI: American Society of Agronomy. 1983.

TROUT, T.J.; DEJONGE, K.C. Water productivity of maize in the US high plains. **Irrigation Science**, v. 35, n. 3, p. 251-266, 2017.

VAN DIEPEN, C. V.; WOLF, J.; VAN KEULEN, H.; RAPPOLDT, C. WOFOST: a simulation model of crop production. **Soil use and management**, v. 5, n. 1, p. 16-24, 1989

WEI, Y.; JIN, J.; JIANG, S.; NING, S.; LIU, L. Quantitative response of soybean development and yield to drought stress during different growth stages in the Huaibei Plain, China. **Agronomy**, v. 8, n. 7, p. 97, 2018.

WIJewardana, C.; ALSAJRI, F. A.; IRBY, J. T.; KRUTZ, L. J.; GOLDEN, B.; HENRY, W. B.; WEI, G.; REDDY, K. R. Physiological assessment of water deficit in soybean using midday leaf water potential and spectral features. **Journal of Plant Interactions**, v. 14, n. 1, p. 533-543, 2019.

ZHANG, B.; FENG, G.; AHUJA, L.R.; KONG, X.; OUYANG, Y.; ADELI, A.; JENKINS, J.N. Soybean crop-water production functions in a humid region across years and soils determined with APEX model. **Agricultural water management**, v. 204, p. 180-191, 2018.

3 Conclusões Gerais

A soja BRS 7581RR sofreu redução, quando comparado ao tratamento controle, na altura de plantas de 43,4 e 27,1%, respectivamente, e uma redução da ordem de 60,2% e 36,7% na área foliar, quando o déficit hídrico foi aplicado nos estádios VC-V4 e R1-R5. A biomassa seca acima do solo foi reduzida em 34,8% e 29% nos tratamentos em que os déficits foram aplicados nos estádios VC-V4 e R5-R7, quando comparados ao tratamento controle, respectivamente. Os tratamentos com déficits hídricos aplicados nos estádios VC-V4, R1-R5 e R5-R7, apresentaram valores maiores de relação raiz/parte aérea de 29%, 23% e 23%, respectivamente, quando comparado ao tratamento controle. O déficit hídrico aplicado nos estádios VC-V4, R1-R5 e R5-R7, ocasionou uma redução de 21,4%, 28,6% e 28,6% no peso de 1000 grãos, quando comparado ao tratamento controle. O déficit hídrico aplicado no estádio R5-R7 acarretou em uma redução de 32% no rendimento final da soja BRS 7581RR. Constatou-se correlação linear entre o déficit hídrico no solo com o peso de 1000 grãos e com a produtividade.

O modelo AquaCrop apresentou bom desempenho na estimativa da evolução da cobertura vegetal, biomassa e produtividade da soja BRS 7581RR submetida a déficits hídricos aplicados em diferentes estádios de crescimento. Porém não simulou satisfatoriamente o conteúdo de água no solo e a evapotranspiração atual.

O déficit hídrico no solo aplicado no intervalo de 60% a 80% e 80% a 100% ocasiona uma redução média de 42% no rendimento final da soja BRS 7581RR. O coeficiente de cultivo médio da soja BRS 7581RR variou de 0,75 a 1,18. O fator de rendimento da soja BRS 7581RR foi igual a 1,25. A produtividade de uso da água foi igual estatisticamente entre os tratamentos com déficits hídricos variando de 40% a 60%, 60% a 80% e 80% a 100%. Considerando a produtividade de uso da água, a melhor estratégia adotada foi a do tratamento que teve o déficit hídrico no solo variando de 40% a 60%.

A soja estudada apresentou maior sensibilidade ao déficit hídrico nos estádios de desenvolvimento correspondentes ao florescimento até a formação de vagens (R1-R5) e enchimento de grãos (R5-R7). Menor produtividade de uso da água foi observada quando o déficit hídrico foi aplicado no estádio inicial da cultura (VC-V4).

Os fatores de rendimento para os modelos e estádios de desenvolvimento da cultura estudados (VC-V4, V5-R1, R1-R5 e R5-R7) foram: Stewart. 1977: 0,32, 0,25, 0,63 e 0,75; Jensen et al., 1968: 0,21, 0,14, 0,43 e 0,46; Minhas et al., 1974: 0,22, 0,16,

0,42 e 0,44. Os fatores de rendimento obtidos em todos os modelos de produção formam maiores durante os estádios R1-R5 e R5-R7, mostrando a maior sensibilidade da soja nesses estádios. Os fatores de rendimento de Jensen et al., 1968 e Stewart. 1977 apresentaram os melhores desempenho na estimativa do rendimento da soja sob déficit hídrico.