

ÉLVIS DA SILVA ALVES

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO ATUAL DA CULTURA DE SOJA:
Modelagem e avaliação da evaporação direta da água do solo**

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

Orientador: Lineu Neiva Rodrigues

Coorientadores: Fernando França da Cunha
Rubens Alves de Oliveira

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2020**

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

T

A474e
2020

Alves, Élvis da Silva, 1990-

Evapotranspiração atual da cultura de soja : modelagem e
avaliação da evaporação direta da água do solo / Élvis da Silva
Alves. – Viçosa, MG, 2020.

85 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Lineu Neiva Rodrigues.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Soja - Cultivo. 2. Soja - Irrigação. 3. Estresse hídrico.
4. Hidrologia. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento
de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 633.34

ÉLVIS DA SILVA ALVES

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO ATUAL DA CULTURA DE SOJA:
Modelagem e avaliação da evaporação direta da água do solo**

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

APROVADA: 08 de dezembro de 2020.

Assentimento:



Elvis da Silva Alves

Autor



Lineu Neiva Rodrigues

Orientador

Aos meus pais
Edivaldo Alves Barbosa
Maria José da Silva Barbosa.

Meus avós maternos
Domingo Aureliano da Silva (*In memória*)
e Maria do Carmo da Silva (*In memória*)

Meus avós paternos
José Barbosa da Silva,
e Josefa Alves da Silva (*In memória*).

A toda minha família.

D E D I C O

A comunidade científica
Ao povo brasileiro

O F E R E Ç O

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, e através dela viver momentos ímpares como o atual, alcançado o mais alto degrau acadêmico.

Aos meus pais, Sra. Maria José da Silva Barbosa e Sr. Edivaldo Alves Barbosa, que depositaram em mim toda a confiança, além dos incontáveis momentos de apoio.

A minha filha Raine, a todos os meus familiares, tios e tias, primos e primas, sobrinhos e sobrinhas, e demais membros, pelas palavras de conforto, estímulo e confiança.

A família que conquistei no Estado do Goiás, na pessoa do patriarca Sr. José Ramalho e da matriarca Sra. Eunice Viégas, especialmente a Amanda, minha companheira, como também a Laura e o João Miguel, meus filhos do coração, vocês foram o grande apoio na fase final desse processo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Lineu Neiva Rodrigues, a quem tenho mais que um orientador. Agradeço por sua amizade, atenção, parceria, respeito e pelos momentos de encorajamento.

Aos Prof. Dr. Fernando França da Cunha e Prof. Dr. Rubens Alves de Oliveira, pela amizade e também por terem aceitado fazer parte da coorientação desta tese.

Aos amigos e parceiros Diego Bispo, Douglas Lorena e Silas Alves, que além na amizade, cooperaram comigo na execução e avaliação dos experimentos.

A Universidade Federal de Viçosa, especificamente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, por ter possibilitado minha entrada e permanência na pós-graduação, além de ter me dado grande apoio quando estive doente em Viçosa.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola – UFV, que tornaram agradáveis nossas aulas, com as salas limpas, aparelhos audiovisuais sempre em perfeito funcionamento.

Aos Professores Dr. Fernando França da Cunha, Dr. Carlos Augusto Brasileiro de Alencar, Dr. João Carlos Cury Saad e Dr. Antônio Pires de Camargo por terem aceitado participar da banca de defesa.

A todo corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola da UFV, agradeço pelo conhecimento compartilhado e pelas horas de dedicação na complementação deste conhecimento.

A Embrapa Cerrados, por conceder toda infraestrutura para implantação e desenvolvimento dos experimentos, além da equipe dos laboratórios, que realizaram todas as avaliações.

A Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal - FAPDF (projeto Termo de Outorga 541/2016 FAPDF), por financiar parte deste estudo.

Ao Projeto Soja da Embrapa Cerrados, pelo acompanhamento técnico durante todos os experimentos.

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

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001, por financiar parte deste estudo.

Também gostaria de agradecer a todos os amigos (as) e colegas que passaram pelo alojamento da Embrapa Cerrados durante o período que permaneci; foram dias de muito aprendizado.

Aos amigos da graduação e pós-graduação que fiz no decorrer do período que permaneci na Universidade Federal de Viçosa, especialmente os funcionários do Laboratório de Hidráulica, componentes do CRRH e GESAI.

Gostaria de destacar alguns amigos que me ajudaram de forma especial, são eles: Jannaylton, irmão de alojamento e de vida; Roberto Filgueiras e Daniel Althoff, que me ajudaram muito durante minha permanência em Viçosa e na qualificação; e Diego Bispo e Douglas Lorena, grandes parceiros de campo e de descontração.

Quero aqui separar um espaço especial para todas as pessoas que estenderam sua mão a mim, quando em um momento difícil, fiquei internado durante 8 dias no hospital São Sebastião acometido de Chicungunha. Quero agradecer especialmente ao Jannaylton e ao Roberto Filgueiras, por serem minha família naquele momento, as pessoas que ficaram como acompanhantes nos dias e noites difíceis, meu muito obrigado. Também gostaria de ser grato a todos que foram me visitar durante minha internação. Por fim, gostaria de agradecer ao Rafael Capixaba por ter me levado até o aeroporto, para que eu pudesse continuar meu tratamento em Alagoas.

Por fim, agradeço a todos e a todas que fizeram parte da realização deste grandioso trabalho. Aqueles que porventura esqueci, desde já, minhas sinceras desculpas.

BIOGRAFIA

ÉLVIS DA SILVA ALVES nasceu no dia 14 de julho de 1990 em Penedo, Alagoas, filho de Maria José da Silva Barbosa e Edivaldo Alves Barbosa.

Em dezembro de 2007, concluiu o curso de Técnico em Agropecuária pela Escola Agrotécnica Federal de Satuba / AL.

Em julho de 2014, concluiu o curso de Graduação em Agronomia pela Universidade Federal de Alagoas, *Campus* de Arapiraca.

Em agosto de 2014, iniciou o Mestrado em Agronomia, com ênfase em Irrigação e Drenagem, pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – Faculdade de Ciências Agrônômicas – Botucatu / SP, obtendo o título em dezembro de 2016.

Em março de 2017, iniciou o Doutorado no programa de Engenharia Agrícola, com ênfase em Recursos Hídricos e Ambiental, pela Universidade Federal de Viçosa - MG, obtendo o título em dezembro de 2020.

“Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais certo de vencer é tentar mais uma vez”.

Thomas Edison

RESUMO

ALVES, Élvis da Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2020.
Evapotranspiração atual da cultura de soja: Modelagem e avaliação da evaporação direta da água do solo. Orientador: Lineu Neiva Rodrigues.
Coorientadores: Fernando França da Cunha e Rubens Alves de Oliveira.

Apesar da soja ser uma cultura tipicamente cultivada em condições de sequeiro, a alta variabilidade das precipitações em regiões como a do Cerrado brasileiro, aliada à necessidade cada vez maior de aumentar a produtividade da cultura, tem contribuído para o crescimento da irrigação, que é a principal usuária de recursos hídricos, demandando melhorias no manejo de irrigação. Assim, o objetivo geral deste trabalho foi contribuir para aprimorar o manejo da irrigação da soja na região do Cerrado brasileiro por meio da melhoria dos métodos de estimativa da evaporação da água no solo e evapotranspiração atual da cultura (ETa). Para isso, foram conduzidos entre os anos de 2018 e 2019, na Embrapa Cerrados, cinco experimentos com objetivos diferentes. Dentre eles, três foram conduzidos com a cultura da soja, cultivar BRS 7581RR. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados com cinco tratamentos (T1, T2, T3, T4 e T5) e quatro repetições. O manejo da irrigação nos tratamentos foi conduzido de forma a manter diferentes níveis de déficits hídricos no solo. T1: déficit hídrico de 0 a 20% da água disponível no solo (AD); T2: 20 a 40% da AD; T3: 40 a 60% da AD; T4: 60 a 80% da AD; e T5: 80% a 100%. Nesses tratamentos, foram avaliados os seguintes atributos da cultura da soja: fenologia, a produtividade e a ETa, pelos modelos FAO56 Dual (ETa_{DUAL}), modelo de Jensen e Hermann (ETa_{JEN}), AquaCrop (ETa_{ACRP}) e Ritchie (ETa_{RIT}). Com o objetivo de avaliar a influência da cobertura e do secamento do solo na evaporação direta (Es), foram realizados três experimentos em três períodos diferentes, sendo o experimento 1 (E1) realizado de 23/05/2019 a 16/06/2019, o experimento 2 (E2) realizado de 18/07/2019 a 11/08/2019 e o experimento 3 (E3) teve sua realização de 21/08/2019 a 14/09/2019. Os tratamentos foram: tratamento 1 (T1) = 0% de cobertura (descoberto); T2 = 10% de cobertura; T3 = 25% de cobertura; T4 = 50% de cobertura; T5 = 75% de cobertura; e T6 = 100% de cobertura (cobertura completa). Os experimentos foram instalados com delineamento inteiramente casualizado. Paralelamente foi realizado um experimento para avaliar a influência da altura dos microlisímetros (ML) na estimativa da Es. Esse experimento foi realizado com oito repetições e três diferentes alturas dos

ML ($Ta_1 = 300$ mm, $Ta_2 = 200$ mm e $Ta_3 = 100$ mm). Os resultados dos experimentos com a cultura da soja mostraram que a altura média da planta no tratamento T1 (0 a 20% de déficit) foi 52% maior comparada à T5 (80 a 100% de déficit), no inverno, e 39% no verão. A profundidade média do sistema radicular, em T1, foi cerca de 44% maior que em T5 no inverno e 40% no verão. Já a produtividade da soja reduziu 50% do tratamento T1 para T5, no experimento de inverno, e 34%, no verão. Para a ETa, quando comparou os modelos com valores observados, o modelo ETa_{DUAL} apresentou melhor desempenho na estimativa da ETa da soja para as condições de inverno para a maior parte dos tratamentos, com NSE variando entre 0,42 a 0,83. No verão, o modelo ETa_{JEN} foi o que apresentou os melhores resultados, com NSE variando entre 0,70 a 0,94. Por sua vez, nos experimentos de evaporação, observou-se que a evaporação acumulada até os 25 dias após a irrigação foi menor nos microlisímetros com 100 mm de altura, quando comparados aos microlisímetros com 200 e 300 mm, para todos os experimentos, da ordem de 52% e 53%, respectivamente. Os modelos desenvolvidos para calcular a evaporação do solo em função dos dias após a irrigação e do percentual de cobertura do solo apresentou desempenho satisfatório, com NSE médio de 0,90.

Palavras-chave: Estresse hídrico. Manejo de irrigação. Hidrologia. Recursos hídricos

ABSTRACT

ALVES, Élvís da Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2020. **Actual evapotranspiration of soybean: Modeling and evaluation of direct evaporation of soil water.** Advisor: Lineu Neiva Rodrigues. Co-Advisors: Fernando França da Cunha and Rubens Alves de Oliveira.

Although the soybean is a typically planted crop in dry conditions to high variability of rainfall in regions such as the Brazilian Savannah, combined with the growing need to increase the productivity of culture, it has contributed to the growth of irrigation, which is main user of water resources, demanding improvements in irrigation management. Thus, the aim of this study was to contribute to improve irrigation management in the region of the Brazilian Cerrado by improving the evaporation estimation methods and actual evapotranspiration of soybean (ET). To this end, five experiments with different objectives were conducted between 2018 and 2019 at Embrapa Cerrados. Among them, three were conducted with soybean cultivar, cultivar BRS 7581RR. The experimental design used was in randomized blocks with five treatments (T1, T2, T3, T4 and T5) and four repetitions. The management of irrigation in treatments was carried out in order to maintain different levels of water deficits in the soil. T1: water deficit from 0 to 20% of the available water (AW); T2: 20 to 40% of the AD; T3: 40 to 60% of the AD; T4: 60 to 80% of the AD; and T5: 80% to 100%. In these treatments, phenology, productivity and ETa were evaluated by the FAO56 Dual models (ETa_{DUAL}), model by Jensen and Hermann (ETa_{JEN}), AquaCrop (ETa_{ACRP}) and Ritchie (ETa_{RIT}), from soybean culture. In order to evaluate the influence of cover and soil drying on direct evaporation (Es), three experiments were carried out in three different periods, with experiment 1 (E1) being carried out from 05/23 to 06/16, experiment 2 (E2) carried out from 07/18 to 08/11 and experiment 3 (E3) was carried out from 08/21 to 09/14. The treatments were: treatment 1 (T1) = 0% coverage uncovered; T2 = 10% coverage; T3 = 25% coverage; T4 = 50% coverage; T5 = 75% coverage; and T6 = 100% coverage (complete coverage). The experiments were installed with a completely randomized design. The treatments consisted of six different percentages of coverage of the internal area of the microlysimeters (ML) (0, 10, 25, 50, 75 and 100%), with four replications. In parallel, an experiment was carried out to assess the influence of the height of the microlysimeters (ML) on the Es estimate. This experiment was carried out with eight repetitions and three different

heights of the ML ($Ta_1 = 300$ mm, $Ta_2 = 200$ mm and $Ta_3 = 100$ mm). The results showed that the average height of the plant was about 52% higher in the T1 treatment (0 to 20% deficit) compared to the T5 (80 to 100% deficit), in the winter, and 39% in the summer. The average depth of the root system, in T1, was about 44% greater than in T5 in winter and 40% in summer. The soybean productivity reduced 50% of the T1 to T5 treatment, in the winter experiment, and 34%, in the summer. For ET_a , when comparing the models with observed values, the ET_{aDUAL} model performed better in estimating the soy ET_a for winter conditions for most treatments, with NSE ranging from 0.42 to 0.83. In the summer, the ET_{aJEN} model showed the best results, with NSE ranging from 0.70 to 0.94. In turn, in the evaporation experiments, he observed that the accumulated evaporation up to 25 days after irrigation was lower in the microlysimeters with 100 mm height, when compared to the microlysimeters with 200 and 300 mm, for all experiments, in the order of 52 % and 53%, respectively. The models developed to calculate the evaporation of the soil as a function of the days after irrigation and the percentage of soil cover presented satisfactory performance, with average $NSE = 0.90$.

Keywords: Water stress. Irrigation management. Hydrology. Water resources

SUMÁRIO

1	Introdução geral.....	13
1.1	Referências bibliográficas	16
2	Artigos científicos	21
2.1	Artigo 1 - Efeitos do déficit hídrico controlado no crescimento e na produtividade da soja irrigada na Região do Cerrado brasileiro	21
2.1.1	Introdução	21
2.1.2	Material e métodos.....	23
2.1.3	Resultados e discussão	27
2.1.4	Conclusões	35
2.1.5	Agradecimentos	35
2.1.6	Referências.....	35
2.2	Artigo 2 – Modelos para estimativa da evapotranspiração atual da cultura da soja em condições de déficit hídrico.	38
2.2.1	Introdução	38
2.2.2	Material e métodos.....	41
2.2.3	Resultados e discussões	46
2.2.4	Conclusões	57
2.2.5	Agradecimentos	58
2.2.6	Referências.....	58
2.3	Artigo 3 – Evaporação direta da água do solo em função do secamento e da porcentagem de cobertura do solo.....	62
2.3.1	Introdução	63
2.3.2	Material e métodos.....	65
2.3.3	Resultados e discussão	69
2.3.4	Conclusões	80
2.3.5	Agradecimentos	80
2.3.6	Referências.....	81
3	Conclusões gerais	85

1 Introdução geral

Com uma área cultivada de aproximadamente 37 milhões de hectares, tipicamente em condições de sequeiro, e uma produtividade média nacional de 3,3 Mg ha⁻¹ e produção total de 120,9 milhões de toneladas, na safra 2019/2020, o Brasil é o maior produtor de soja do mundo (CONAB, 2020). Mais da metade da área cultivada com soja no Brasil, na safra de 2018/19, estava concentrada no bioma Cerrado (AGROSATÉLITE, 2020), que corresponde a aproximadamente 45% da área agrícola nacional (IBGE, 2017).

Embora apenas 11% das lavouras brasileiras de soja utilizem a irrigação (SILVA *et al.*, 2019) por conta da elevada variabilidade das precipitações, que traz incertezas quanto à produção (WANG *et al.*, 2020; MONTOYA *et al.*, 2017), tem-se observado nos últimos anos na região do Cerrado um aumento da área de soja irrigada. Com cerca de 64% da área irrigada no Brasil (BRASIL, 2014), que concentra aproximadamente 80% de todos os pivôs centrais (ALTHOFF; RODRIGUES, 2019), a região do Cerrado brasileiro tem enfrentado sérios problemas de escassez hídrica em algumas de suas principais bacias hidrográficas.

Se não for bem planejado, o crescimento da irrigação no Cerrado pode implicar no aumento de conflitos pelo uso de água nas bacias hidrográficas, que já se encontram com baixa disponibilidade hídrica. Desta forma, é importante desenvolver estratégias para reduzir a quantidade de água retirada dos mananciais pelos diversos usos, o que pode ser viabilizado por meio de um planejamento integrado de bacia hidrográfica, que estabeleça estratégias efetivas para aumentar a eficiência dos diversos usos, principalmente da irrigação, que é a principal usuária.

Qualquer estratégia que objetive melhorar a eficiência da irrigação deve priorizar o ajuste do manejo. Nesse sentido, é fundamental melhorar as estimativas da evapotranspiração atual da cultura (ETa), sendo necessário, para isso, considerar as especificidades das culturas e as características regionais para o desenvolvimento ou refinamento de coeficientes técnicos, a exemplo do coeficiente de cultura médio e basal, coeficiente de estresse hídrico da planta e do solo, objetivando melhor estimativa a evapotranspiração atual da cultura (GAJIĆ *et al.*, 2018; JHA *et al.*, 2018; MONTOYA *et al.*, 2017).

Em algumas condições, é possível reduzir a irrigação sem reduzir a produtividade. Com vista ao aumento de produtividade de uso de água, é fundamental entender, principalmente para as novas variedades de soja, em que magnitude o déficit

de água no solo influencia as características da planta e sua produtividade. Outro ponto a ser considerado, quando se trabalha com a agricultura irrigada, seja com irrigação total ou com déficit, são os fatores que podem influenciar no seu crescimento e na fenologia. No caso da cultura da soja, a temperatura e o número de horas de luz exercem grande influência na fenologia, já para o manejo da cultura, a data de semeadura e as cultivares utilizadas são as mais importantes (ANDA *et al.*, 2020; LIU; DAI, 2020; MESQUITA *et al.*, 2020).

Montoya *et al.* (2017) obtiveram maior produtividade e lucro ao aplicar uma irrigação correspondente a 75% da necessidade hídrica da soja, nos estágios R1 a R8. Nunes *et al.* (2016) observaram redução de 36% no rendimento da cultura de soja ao aplicarem metade da necessidade de irrigação. Aydinsakir (2018) observou queda de 8% na produtividade da cultura da soja quando aplicou 75% da necessidade hídrica da cultura.

Outra forma de tornar o manejo mais eficiente é através da melhoria de modelos matemáticos desenvolvidos para o manejo. Dentre os modelos existentes, aquele proposto por Doorenbos e Pruitt (1977) que calcula a evapotranspiração potencial da cultura (E_{Tp}) por meio da relação entre a evapotranspiração de uma cultura de referência (E_{To}) e um coeficiente de cultura (K_c), pela sua simplicidade e facilidade de programação e de operacionalização, tem sido o mais utilizado. Entretanto, esse modelo não permite que os efeitos da transpiração e da evaporação direta da água do solo sejam individualizados.

Outras abordagens que apresentam grande potencial de aplicação, são aquelas baseadas em metodologias que estimam a E_T por meio do cálculo individualizado da transpiração e da evaporação direta da água do solo (E_s), como o modelo de Jensen e Heermann (JENSEN; HEERMANN, 1970), modelo de Ritchie (1972), FAO56 Dual e AquaCrop (HSIAO *et al.*, 2009; RAES *et al.*, 2009; STEDUTO *et al.*, 2009). Essas abordagens são, também, úteis na gestão de bacias hidrográficas, pois possibilitam investigar a magnitude da E_s , que é considerada uma perda de água não benéfica para o sistema, ou seja, essa água não contribui efetivamente para a produção (Rodrigues e Pruski, 2019).

A perda por evaporação direta de água do solo é um dos componentes do balanço hídrico mais significativo (RAZ-YASEEF *et al.*, 2010), no entanto, é muito pouco estudada. Em um sistema produtivo, as perdas por E_s são significativas. Klocke

et al. (1985) observaram que a Es representou cerca de 30% da evapotranspiração de uma cultura de milho.

Embora a Es seja um processo físico influenciado pelas características e manejo do solo e por diversas interações ambientais, a disponibilidade de energia e água são fatores que regulam esse processo de forma predominante. Klocke *et al.* (1990) afirmaram que a frequência de umedecimento e o percentual de cobertura, como também as características físicas do solo, são as características que mais influenciam na Es.

A Es é um processo dinâmico que pode ser estimada por meio de modelagem matemática (ALLEN *et al.*, 1998, 2006; JENSEN *et al.*, 1971; BLACK *et al.*, 1969), balanço de energia (HILLEL, 1980) e pelo balanço de água no solo (HANKS; ASHCROFT, 1980), com destaque para os lisímetros de pesagem (FARIA JUNIOR *et al.*, 2019; QUINN *et al.*, 2018). Apesar da sua precisão, os lisímetros de pesagem apresentam custos elevados de construção e instalação (SCHNEIDER *et al.*, 1998), o que dificulta a sua aplicação.

Os microlisímetros (ML), embora menos precisos devido à sua pequena superfície evaporante, tem se apresentado como uma boa alternativa aos lisímetros de pesagem e drenagem, tendo sido utilizados em diversos trabalhos de estimativa da Es (BARIVIERA *et al.*, 2020; FEIGENWINTER *et al.*, 2020; FARIA JUNIOR *et al.*, 2019; UCLÉS *et al.*, 2013; FLUMIGNAN *et al.*, 2012; DALMAGO *et al.*, 2010). A alteração na área da superfície evaporante do solo causada pela variação no tamanho do diâmetro do ML, que normalmente varia de 50 a 300 mm, não influenciou significativamente na taxa de Es (NINARI; BERLINER, 2002; DAAMEN *et al.*, 1993). Na altura dos ML (100 e 200 mm), por outro lado, foram observadas diferenças significativas para os valores de Es a partir de dois dias após a irrigação (DAAMEN *et al.*, 1993). Segundo Agam (2014), a discussão sobre a profundidade ideal dos ML ainda precisa ser melhor estudada.

No manejo da irrigação, diversos modelos, com diferentes abordagens, possibilitam estimar a evapotranspiração da cultura (ET), separando a Es da transpiração (T) (HSIAO *et al.*, 2009; RAES *et al.*, 2009; STEDUTO *et al.*, 2009; KROES *et al.*, 2008; ALLEN *et al.*, 1998; RITCHIE, 1972). Essas diferentes abordagens geralmente consideram, no cálculo do Es, a influência da cobertura do solo, que pode ser calculada por meio do índice de área foliar (IAF) ou da percentagem de solo coberto (CC). Em estudo realizado comparando a Es em ambientes sombreados

e não sombreados, Raz-Yaseef *et al.* (2010) observaram que os valores de Es, foram em média o dobro nas áreas descobertas, quando comparados às áreas sombreadas.

Além da porcentagem de cobertura do solo, a taxa de evaporação varia em função da umidade do solo. Esse processo é normalmente dividido em três fases (IDSO *et al.*, 1974; PHILIP, 1957; LEMON, 1956). Na primeira fase, a taxa de evaporação é governada predominantemente pela demanda atmosférica. Na fase 2, quando a disponibilidade de água diminui e a superfície do solo apresenta-se mais seca, a taxa de evaporação passa a depender em maior magnitude do processo de difusão de vapor de água, que depende, entre outras coisas, da porosidade e da tortuosidade do meio poroso. Nesta fase, a Es é mantida pelos fluxos ascendentes de água do solo. A Es diminui com o decréscimo de umidade do solo. A dinâmica de secamento na fase 3 é semelhante à fase 2, mas é de menor importância para agricultura irrigada em virtude da frequência de umedecimento do solo devido a irrigação.

Diante do expressivo crescimento da agricultura irrigada no Cerrado brasileiro e do aumento dos conflitos pelo uso de água, há necessidade de desenvolver coeficientes técnicos de irrigação para as novas variedades de cultura e melhorar o manejo de irrigação na região. Para isto, é fundamental melhorar as estimativas da ETa, principalmente do componente Es. Neste trabalho teve-se como objetivo geral contribuir para aprimorar o manejo da irrigação da soja cultivada na região do Cerrado brasileiro por meio da melhoria de métodos de estimativa da evaporação e evapotranspiração atual da cultura.

1.1 Referências bibliográficas

AGAM, N. Comment on “Microlysimeter station 1 for long term non-rainfall water input and evaporation studies” by Uclés *et al.* **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 194, p. 255–256, 2014.

AGROSATÉLITE, ABIOVE. **Análise geoespacial da soja no bioma Cerrado: dinâmica da expansão | aptidão agrícola da soja | sistema de avaliação para compensação financeira: 2001 a 2019**. Florianópolis: 2020.

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M. **Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements**. **FAO Irrigation and drainage paper 56**. Roma, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, J. **Evapotranspiration del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de água de los cultivos**. Roma: FAO, 2006. 298 p.

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

ANDA, A.; SOÓS, G.; MENYHÁRT, L.; KUCSERKA, T.; SIMON, B. Yield features of two soybean varieties under different water supplies and field conditions. **Field Crops Research**, v. 245, p. 107673, 2020.

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

BARIVIERA, G. *et al.* Dual crop coefficient for the early-cycle soybean cultivar SoyTech 815 RR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 2, p. 75–81, 2020.

BLACK, T. A.; GARDNER, W. R.; THURTELL, G. W. The Prediction of Evaporation, Drainage, and Soil Water Storage for a Bare Soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 33, n. 5, p. 655–660, 1969.

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

CONAB. **Conab - Safra Brasileira de Grãos, V. 7 - SAFRA 2019/20**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 5 ago. 2020.

DAAMEN, C.C.; SIMMONDS, L.P.; WALLACE, J.S.; LARYEA, K.B.; SIVAKUMAR, M.V.K. Use of microlysimeters to measure evaporation from sandy soils. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 65, n. 3, p. 159–173, 1993.

DALMAGO, G.A.; BERGAMASCHI, H.; KRÜGER, C.A.M.B.; BERGONCI, J.I.; COMIRAN, F.; HECKLER, B.M.M. Evaporação da água na superfície do solo em sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 8, p. 780–790, 2010.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24**. Roma, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1977.

FARIA JUNIOR, C.A.; DALLACORT, R.; FREITAS, P.S.L.; BARBIERI, J.D.; REZENDE, R.; FENNER, Coeficiente dual de cultivo do milho pipoca em Tangará da Serra – MT. **IRRIGA**, v. 24, n. 3, p. 473–485, 2019.

FEIGENWINTER, C.; FRANCESCHI, J.; LARSEN, J.A.; SPIRIG, R.; VOGT, R. On the performance of microlysimeters to measure non-rainfall water input in a hyper-arid environment with focus on fog contribution. **Journal of Arid Environments**, v. 182, p. 104260, 2020.

FLUMIGNAN, D. L.; FARIA, R. T. DE; LENA, B. P. Test of a microlysimeter for measurement of soil evaporation. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 1, p. 80–90, 2012.

GAJIĆ, B.; KRESOVIĆ, B.; TAPANAROVA, A.; ŽIVOTIĆ, L.; TODOROVIĆ, M. Effect of irrigation regime on yield, harvest index and water productivity of soybean grown under different precipitation conditions in a temperate environment. **Agricultural Water Management**, v. 210, p. 224–231, 2018.

HANKS, R. J.; ASHCROFT, G. L. **Applied soil physics**. Springer-Verlag, New York, 1980.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. 1980.

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.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo agropecuário. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/>. Acesso em 02 jul. 2020.

IDSO, S.B.; REGINATO, R.J.; JACKSON, R.D.; KIMBALL, B.A.; NAKAYAMA, F.S. The Three Stages of Drying of a Field Soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 38, n. 5, p. 831–837, 1974.

JENSEN, M. E.; HEERMANN, D. F. **Meteorological approaches to irrigation scheduling**. 1970.

JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; PRATT, B. J. Estimating Soil Moisture Depletion from Climate, Crop and Soil Data. **Transaction of the ASAE**, v. 14, n. 5, p. 954–959, 1971.

JHA, P. K.; KUMAR, S. N.; INES, A. V. M. Responses of soybean to water stress and supplemental irrigation in upper Indo-Gangetic plain: Field experiment and modeling approach. **Field Crops Research**, v. 219, p. 76–86, 2018.

KLOCKE, N. L.; HEERMANN, D. F.; DUKE, H. R. Measurement of evaporation and transportation with lysimeters. **Transactions of the ASAE**, v. 28, n. 1, p. 183–0189, 1985.

KLOCKE, N.L.; MARTIN, D.L.; TODD, R.W.; DEHAAN, D.L.; POLYMENOPOULOS, A.D. Evaporation measurements and predictions from soils under crop canopies. **Transactions of the ASAE**, v. 33, n. 5, p. 1–1596, 1990.

KROES, J.G.; DAM, J.C.V.; GROENENDIJK, P.; HENDRIKS, R.F.A.; JACOBS, C.M.J. SWAP Version 3.2. **Theory description and user manual**. p. 262, 2008.

LEMON, E. R. The Potentialities for Decreasing Soil Moisture Evaporation Loss. **Soil Science Society of America Journal**, v. 20, n. 1, p. 120–125, 1956.

LIU, Y.; DAI, L. Modelling the impacts of climate change and crop management measures on soybean phenology in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 262, p. 121271, 2020.

MESQUITA, R.O.; COUTINHO, F.S.; VITAL, C.E.; NEPOMUCENO, A.L.; WILLIAMS, T.C.R.; RAMOS, H.J.O.; LOUREIRO, M.E. Physiological approach to decipher the drought tolerance of a soybean genotype from Brazilian Savana. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 151, p. 132–143, 2020.

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.

NINARI, N.; BERLINER, P. R. The role of dew in the water and heat balance of bare loess soil in the Negev Desert: quantifying the actual dew deposition on the soil surface. **Atmospheric Research**, 2nd International Conference on Fog and Fog Collection. v. 64, n. 1, p. 323–334, 2002.

NUNES, A.C.; BEZERRA, F.M.L.; SILVA, R. A.; SILVA JÚNIOR, J.L.C.; GONÇALVES, F.B.; SANTOS, G.A. Aspectos agronômicos de plantas de soja submetidas a déficit hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 7, p. 654–659, 2016.

PHILIP, J. R. Evaporation, and moisture and heat fields in the soil. **Journal of meteorology**, v. 14, n. 4, p. 354–366, 1957.

QUINN, R.; PARKER, A.; RUSHTON, K. Evaporation from bare soil: Lysimeter experiments in sand dams interpreted using conceptual and numerical models. **Journal of Hydrology**, v. 564, p. 909–915, 2018.

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.

RAZ-YASEEF, N.; ROTENBERG, E.; YAKIR, D. Effects of spatial variations in soil evaporation caused by tree shading on water flux partitioning in a semi-arid pine forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 3, p. 454–462, 2010.

RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, v. 8, n. 5, p. 1204–1213, 1972.

RODRIGUES, L. N.; PRUSKI, F. F. Fundamentos e benefícios do sistema de integração lavoura-pecuária-floresta para os recursos hídricos. **Embrapa Cerrados- Capítulo em livro técnico (INFOTECA-E)**, 2019.

RODRIGUES, L. N.; DOMINGUES, A. F. **Agricultura Irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável**. Brasília, DF: INOVAGRI, 2017.

SCHNEIDER, A. D. (USDA-A. R. S.) *et al.* A simplified weighing lysimeter for monolithic or reconstructed soils. **Applied engineering in agriculture (USA)**, 1998.

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

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.

UCLÉS, O.; VILLAGARCÍA, L.; CANTÓN, Y.; DOMINGO, F. Microlysimeter station for long term non-rainfall water input and evaporation studies. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 182–183, p. 13–20, 2013.

WANG, C.; LINDERHOLM, H.W.; SONG, Y.; WANG, F.; LIU, Y.; TIAN, J.; XU, J.; SONG, Y.; REN, G. Impacts of Drought on Maize and Soybean Production in Northeast China During the Past Five Decades. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 7, 2020.

2 Artigos científicos

2.1 Artigo 1 - Efeitos do déficit hídrico controlado no crescimento e na produtividade da soja irrigada na Região do Cerrado brasileiro

Resumo: A alta variabilidade das precipitações em regiões como a do Cerrado brasileiro, aliado à necessidade cada vez maior de aumentar a produtividade das culturas, tem contribuído para o crescimento da irrigação, principal usuária de recursos hídricos. O aumento das disputas pelo uso de água nessa região, tem demandado melhorias no manejo de irrigação e aumento da produtividade de uso da água. Neste contexto, a irrigação com déficit se apresenta como uma estratégia de manejo interessante, possibilitando economia de água sem prejuízos significativos à produtividade. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a fenologia e produtividade de uma nova cultivar da cultura de soja (BRS 7581RR) submetida a diferentes condições de déficit hídrico no solo. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados com cinco tratamentos e quatro repetições. O tratamento T1 foi conduzido com déficit hídrico variando de 0 a 20% da água disponível no solo (AD); no tratamento T2, a variação permitida do déficit hídrico foi de 20 a 40% da AD; no tratamento T3 foi de 40 a 60% da AD; em T4 de 60 a 80% da AD; e de 80% a 100% da AD, em T5. Os resultados mostraram que, tanto no inverno quanto no verão, as características fenológicas da planta foram alteradas à medida que o estresse hídrico do solo aumentou. A altura média da planta foi cerca de 52% maior no tratamento T1 (0 a 20% de déficit) comparada à T5 (80 a 100% de déficit), no inverno, e 39% no verão. A profundidade média do sistema radicular, em T1, foi cerca de 44% maior que em T5 no inverno e 40% no verão. No inverno, o IAF diminuiu 50% entre os tratamentos T1 e T5, enquanto no verão a diferença foi 40%. A produtividade média da soja foi aproximadamente 50% maior em T1 que em T5, no experimento de inverno, e de 34%, no verão.

Palavras-chave: Estresse hídrico, manejo de irrigação, evapotranspiração, *Glycine max*.

2.1.1 Introdução

Com uma área cultivada de aproximadamente 37 milhões de hectares, tipicamente em condições de sequeiro, e uma produtividade média (P) nacional de 3,3 Mg ha⁻¹ e produção total de 120,9 Mg ha⁻¹, na safra 2019/2020, o Brasil é o maior

produtor de soja do mundo (CONAB, 2020). Mais da metade da área cultivada com soja no Brasil, na safra de 2019/20, estava concentrada no bioma Cerrado (AGROSATÉLITE, 2020), correspondendo a aproximadamente 45% da área agrícola nacional (CONAB, 2018; IBGE, 2018).

Apesar de apenas 11% das lavouras brasileiras de soja utilizarem a irrigação (SILVA *et al.*, 2019), tem-se observado nos últimos anos na região do Cerrado um aumento da área de soja irrigada. Isto decorre, entre outros motivos, pela elevada variabilidade das precipitações, principalmente durante a primavera e o verão, que traz incertezas quanto à produção (MONTTOYA *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2020) e quando ao melhor momento para se semear. Para Silva *et al.* (2020) o uso da irrigação, mesmo no período das chuvas, tende a reduzir o risco da variabilidade de produtividade entre as safras, como os que foram observado por Montoya *et al.* (2017) que, produzindo soja em regime de sequeiro, observaram que o rendimento de grãos e a biomassa final apresentaram redução de até 35%, quando comparados a sistemas irrigados.

Se não for bem planejado, o crescimento da irrigação no Cerrado pode implicar no aumento de conflitos pelo uso de água em bacias hidrográficas que já se encontram com baixa disponibilidade hídrica e no desequilíbrio hidrológico, comprometendo nascentes de várias regiões hidrológicas do país. Além de um bom planejamento, é fundamental melhorar a eficiência de irrigação. Qualquer estratégia que objetive melhorar a eficiência de irrigação deve priorizar o ajuste do manejo. Além de desenvolver coeficientes técnicos que representem as condições locais, a exemplo do coeficiente de cultura médio e basal, coeficiente de estresse hídrico da planta e do solo, são importantes estudos que tenham uma visão mais integrada da bacia hidrográfica (GAJIĆ *et al.*, 2018; JHA; KUMAR; INES, 2018; MONTTOYA *et al.*, 2017), que levem em consideração melhorias nos valores de eficiência do uso de água de irrigação (EUAi) e de produtividade de uso da água (PA).

Em algumas condições é possível reduzir a irrigação sem reduzir a produtividade. Com vista ao aumento da PA, é fundamental entender, principalmente para as novas variedades de soja, em que magnitude o déficit de água no solo influencia as características da planta e sua produtividade. Outro ponto a ser considerado, quando se trabalha com a agricultura irrigada, seja com irrigação total ou com déficit, são os fatores que podem influenciar no crescimento, na fenologia e consequentemente na produtividade da soja, o que também influenciará na EUAi. Dentre as variáveis do clima, a temperatura e o número de horas de luz são as que mais interferem na

fenologia da soja, já para o manejo da cultura, a data de semeadura, o espaçamento e as cultivares utilizadas são as mais importantes (ANDA *et al.*, 2020; LIU; DAI, 2020; MESQUITA *et al.*, 2020).

Montoya *et al.* (2017) obtiveram maior produtividade ao aplicar uma irrigação correspondente a 75% da necessidade hídrica da soja, nos estágios R1 a R8. Gajić *et al.* (2018) obtiveram maior produtividade da cultura da soja aplicando 65% da irrigação total requerida. Neste mesmo estudo, as parcelas que receberam déficit de 60% da lâmina requerida apresentaram queda de produtividade de apenas 20% em comparação com o valor obtido na parcela com 100% da lâmina requerida. Nunes *et al.* (2016) observaram redução de 36% no rendimento da cultura de soja ao aplicarem metade da necessidade de irrigação. Aydınsakir (2018) observou queda de 8% na produtividade da cultura da soja quando aplicou 75% da necessidade hídrica da cultura.

Diante do expressivo crescimento da agricultura irrigada no Cerrado brasileiro, e da utilização da irrigação durante todo o ano nesta região, sabendo da escassez de informações técnicas sobre a necessidade hídrica da cultura de soja, no presente trabalho teve-se como objetivo avaliar o crescimento e a produtividade de uma nova variedade de soja (BRS 7581RR), submetida a diferentes condições de déficit hídrico no solo.

2.1.2 Material e métodos

Área de estudo

Para avaliação da produtividade e das características biométricas das plantas da soja, considerando diferentes estratégias de irrigação, foram instalados experimentos em duas estações do ano (inverno e verão), com a cultura de soja cultivar BRS 7581RR (tipo indeterminado), na Unidade de Referência em Manejo de Água (URMA). Com elevação de 979 m, a URMA está instalada no 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"O).

O clima da região é classificado como As (Alvares *et al.* 2013), com temperatura média do ar igual a 22°C e precipitação pluvial total média igual a 1.500 mm ano⁻¹, sendo concentrada entre os meses de outubro a março (MALAQUIAS; DA SILVA; EVANGELISTA, 2010). O solo da área é classificado como Latossolo vermelho, contendo 52% de argila.

Manejo da cultura

Com base no resultado da análise química do solo da área experimental, foi realizada a adubação para a cultura de soja, aplicando-se no sulco de semeadura 22,5 kg de N; 112,5 kg de P_2O_5 e 112,5 kg de K_2O por hectare, conforme recomendação de Sousa e Lobato (2004).

A semeadura foi realizada no dia 06 de maio (inverno) e 09 de setembro (verão) de 2019 com a cultivar BRS 7581RR, utilizando 18 sementes por metro linear e espaçamento de 0,5 m entre linhas, equivalente a uma população de 360.000 plantas ha^{-1} . A colheita foi realizada em 09 de agosto e 25 de dezembro de 2019, respectivamente.

Após a semeadura foram aplicadas lâminas de irrigação com o objetivo de manter o solo úmido e assim garantir a germinação e emergência das plântulas. As lâminas foram aplicadas até 10 dias após a semeadura (DAS). A partir do 13 DAS, iniciou-se o monitoramento para aplicação de cada estratégia que foi finalizado aos 90 DAS, no experimento de inverno, e aos 107 DAS, no de verão.

Durante a condução dos experimentos foram realizados os tratamentos fitossanitários necessários, com aplicação de herbicida, fungicida e inseticida.

Delineamento experimental

Os experimentos foram conduzidos 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.

Em cada tratamento foi aplicado uma estratégia de irrigação com base na água disponível no solo (AD). O tratamento T1 foi conduzido com déficit hídrico variando de 0 a 20% da AD; no tratamento T2, o déficit hídrico foi de 20 a 40% da AD; no tratamento T3 foi de 40 a 60% da AD; em T4 foi de 60 a 80% da AD; e de 80% a 100% da AD, em T5.

Manejo da irrigação e medição da umidade do solo

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} . O coeficiente uniformidade de Christiansen

(CUC) realizado na área foi de 90%, e a eficiência de aplicação de água do sistema de irrigação foi igual a 85%.

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

$$LA = \frac{10 (\theta_{LS}[T1, T2, T3, T4 \text{ ou } T5] - \theta_{atual}[T1, T2, T3, T4 \text{ ou } T5])}{Ef} Z \quad (1)$$

em que: LA = lâmina de irrigação aplicada em cada tratamento, mm; θ_{LS} = umidade do solo no limite superior do tratamento, $m^3 m^{-3}$; θ_{atual} = umidade atual do solo em cada tratamento (T1, T2, T3, T4 ou T5), $m^3 m^{-3}$; Z = profundidade do sistema radicular da cultura, cm; e Ef = eficiência de aplicação de água do sistema de irrigação (Ef = 0,85).

A irrigação foi aplicada de modo a manter o déficit hídrico no solo estabelecido para cada tratamento. A umidade do solo foi calculada 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.

Demais dados coletados

Os elementos meteorológicos necessários para o manejo da irrigação foram obtidos da estação meteorológica da Embrapa Cerrados, localizada a aproximadamente 2 km do experimento. Foram utilizados dados de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar e precipitação.

A precipitação, devido a sua variabilidade, foi medida por meio de dois pluviômetros instalados na área experimental. A evapotranspiração de referência (ET_o) foi calculada pela equação FAO-Penman Monteith (ALLEN *et al.*, 1998).

Para avaliação da textura do solo, da curva de retenção de água no solo e da densidade aparente foram coletadas dezoito amostras de solo nas camadas de 0-20 e 20-40 cm. Para estimativa da textura, utilizou-se o procedimento definido por Teixeira *et al.* (2017). Na construção da curva retenção utilizou-se a metodologia da mesa de tensão (LEAMER; SHAW, 1941; OLIVEIRA, 1968) para os pontos de 1, 3, 6, 10, 33,

60 kPa e câmara de Richards (RICHARDS, 1947) para 800 e 1500 kPa. Para a densidade do solo foi utilizado o método do anel volumétrico (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

O solo foi classificado como argiloso com 37, 51 e 12% de areia, argila e silte, respectivamente, na camada de 0 a 20 cm, e 32, 52 e 16% areia, argila e silte, respectivamente, na camada de 20 a 40 cm. Para as camadas de 0 a 20 e 20 a 40 cm, as umidades do solo na capacidade de campo foram iguais a 0,35 e 0,34 m³ m⁻³ e o ponto de murcha permanente iguais a 0,23 e 0,22 m³ m⁻³, respectivamente.

O índice de área foliar (IAF) foi calculado pela razão entre a área foliar média por planta (AF) e a densidade de plantio (PP). Para estimativa da AF foram coletadas, na frequência de dez dias, oito plantas por tratamento. Após a coleta, as plantas foram acondicionadas em sacos plásticos e levadas ao Laboratório de Biologia Vegetal da Embrapa Cerrados, onde as folhas das plantas foram separadas e a área foliar calculada por meio de um planímetro eletrônico (LI-3100C). O IAF foi calculado para todos os tratamentos para os experimentos de inverno e de verão.

No dia de coleta da AF, mediu-se, por meio do software Canopeo (PATRIGNANI; OCHSNER, 2015), a porcentagem de cobertura do solo pela vegetação (CC). Para isto, foram obtidas, por meio de smartphone, sempre no mesmo local, quatro fotos por tratamento de uma área com dimensão de 1,0 x 1,0 m. Para padronizar o processo de obtenção das fotos, construiu-se um suporte de apoio para o *smartphone*. As fotos eram obtidas sempre entre 15 e 17 horas.

A profundidade do sistema radicular e a altura do caule da cultura de soja foram avaliadas semanalmente em todos os tratamentos para os experimentos de inverno e de verão. Para isto, retirava-se aleatoriamente quatro plantas na área de cada unidade experimental e media-se o comprimento máximo da raiz e altura do caule. A retirada da planta foi realizada utilizando uma pá reta, com comprimento de 40 cm. Como o solo estava sempre úmido, mesmo nas áreas com estresse, houve facilidade da retirada raízes.

A produtividade da cultura foi obtida para cada uma das quatro repetições, através do peso dos grãos colhidos em 2,0 m para cada repetição. As plantas foram retiradas manualmente e inseridas em uma trilhadora mecanizada. Seguidamente, os grãos foram pesados e inseridos no medidor de umidades de grãos, para correção da produtividade para umidade comercial, adotada 13% neste trabalho.

Estimativa da evapotranspiração atual

A evapotranspiração atual da cultura de soja foi calculada com base na variação da umidade do solo nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, estimada pelo método gravimétrico (ET_{AGRA}), e da profundidade do sistema radicular da cultura, por meio da equação

$$ET_{a\ 0-40cm} = A + B, \text{ para } 0 \leq Z \leq 40 \quad (2)$$

$$A = 10 [(\theta_{1i\ 0-20cm} - \theta_{2i-1\ 0-20cm}) D_i] \quad (3)$$

$$B = 10 [(\theta_{1i\ 20-40cm} - \theta_{2i-1\ 20-40cm}) D_i] \quad (4)$$

em que: θ_{1i} = umidade volumétrica no dia i , $m^3\ m^{-3}$; θ_{2i} = umidade volumétrica no dia $i-1$, $m^3\ m^{-3}$; D_i = espessura da camada, cm (20 cm). Para $Z \leq 20$, $B = 0$.

Análises estatísticas

Para avaliar o efeito dos tratamentos na altura do caule, profundidade do sistema radicular, percentual de cobertura e índice de área foliar da cultura de soja, utilizou-se a análise de variância (ANOVA), através do teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

Na determinação da qualidade do ajuste entre as lâminas de irrigação e ETa total com a altura do caule, profundidade do sistema radicular, percentual de cobertura máxima e índice de área foliar máximo da cultura de soja, foram usados o coeficiente de determinação (r^2) e a precisão da estimativa do coeficiente do modelo de regressão (p). Para a qualidade dos modelos gerados da relação entre a lâminas de irrigação e ETa total com a produtividade, além do r^2 , utilizou-se o erro padrão de estimativa (SEE).

2.1.3 Resultados e discussão

Dados climatológicos

As informações referentes à meteorologia do local, para os experimentos de inverno e verão com a cultura da soja, estão apresentadas na Figura 1. No inverno, a temperatura variou de 8,0 a 18,5 °C para a mínima, e 22,5 a 32,0 °C para a máxima. No verão, a variação foi de 13,5 a 21,0 °C e de 26,2 a 37,0 °C para as temperaturas mínimas e máximas, respectivamente. No experimento de verão a temperatura térmica acumulada (TTA) foi igual a 1.354 °C, 61,5% maior que no inverno (Figura 1A). O número de horas de luz no dia foi maior no verão na ordem de 30% que no inverno.

A ETo, estimada pelo modelo de Penman-Monteith, apresentou menores valores no inverno, variando entre 1,6 e 5,2 mm d⁻¹, enquanto no verão essa variação foi entre 1,9 a 7,1 mm d⁻¹. A ETo média calculada no verão foi 40% maior que a ETo média no inverno. Para a ETo acumulada durante o verão, os valores foram maiores que no inverno na ordem de 66% (Figura 1B).

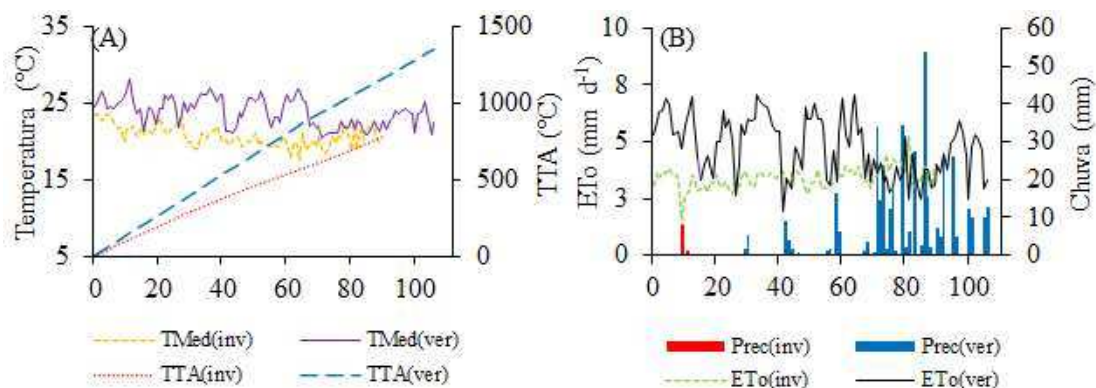


Figura 1. Temperaturas média do ar (Tmed) e térmica acumulada (TTA) (A) e Evapotranspiração de referência (ETo) e precipitação diária (B) nos experimentos de inverno e de verão.

Durante o experimento de inverno foram observados eventos de precipitação apenas nos 9, 10 e 11 DAS, totalizando 9,5 mm durante todo o experimento (Figura 1B). Essas precipitações ocorreram quando a cultura se encontrava na fase de emergência, não interferindo nos tratamentos. Entretanto, durante o experimento de verão, notou-se precipitações maiores que 5 mm a partir dos 30 DAS. As precipitações acima de 5 mm foram observadas em 21 dos 107 dias do ciclo da cultura, sendo que em 34% desses 21 dias foram observadas chuvas acima de 20 mm. A maior concentração de chuvas no experimento de verão foi entre os 71 e 105 DAS, quando a cultura se encontrava na fase de desenvolvimento médio e final. No total, choveu no verão 418 mm.

Para contabilização da precipitação na lâmina total aplicada, foi calculada a precipitação efetiva e somada a lâmina total aplicada pelo sistema de irrigação.

Lâmina de irrigação e evapotranspiração atual

No experimento de inverno a diferença entre a lâmina aplicada no tratamento T1 e T5 foi na ordem de 31%, enquanto no experimento de verão foi de 35%. Quando considerou T1 e T2, a diferença foi de 9%, para T3 foi de 15% e T4 igual a 21%, no

experimento de inverno. No verão, essa variação foi de 10% para T2, 16% para T3 e 31% referente a T4.

Quando observada a diferença da lâmina de irrigação total aplicada entre os experimentos, constatou-se que nos três primeiros tratamentos os valores foram menores no experimento de inverno em 36%, já para T4, a diminuição foi de 30%, enquanto para T5 foi da ordem de 35%.

Para a ETa, o comportamento foi similar ao da lâmina de irrigação total aplicada para os dois experimentos. Para o inverno, entre os tratamentos T1 e T5 encontrou-se diferença da ordem de 33%. Essa diferença entre T2, T3 e T4, quando comparada também a T1, foi de 15, 20 e 26%, respectivamente. No verão, notou-se diferença de 4% entre T1 e T5, e de 4, 12 e 20% para os tratamentos T2, T3 e T4, também quando comparados a T1, respectivamente. Entre os experimentos, a ETa foi maior no experimento de verão, sendo cerca de 40% maior no tratamento T1, 47% em T2 e 45% em T3, T4 e T5.

A ETo acumulada foi cerca de 66% maior no experimento de verão. A diferença entre as variáveis meteorológicas foi também responsável pelas diferenças observadas nas características fenológicas da planta, principalmente a altura do caule, profundidade do sistema radicular e a área foliar.

Crescimento da cultura da soja e do sistema radicular

Na Figura 2, as variáveis altura máxima do caule (H), profundidade máxima do sistema radicular (Z), percentual máximo de cobertura do solo e índice de área foliar máximo foram correlacionadas com a lâmina total de água no solo e com a evapotranspiração atual total da cultura de soja.

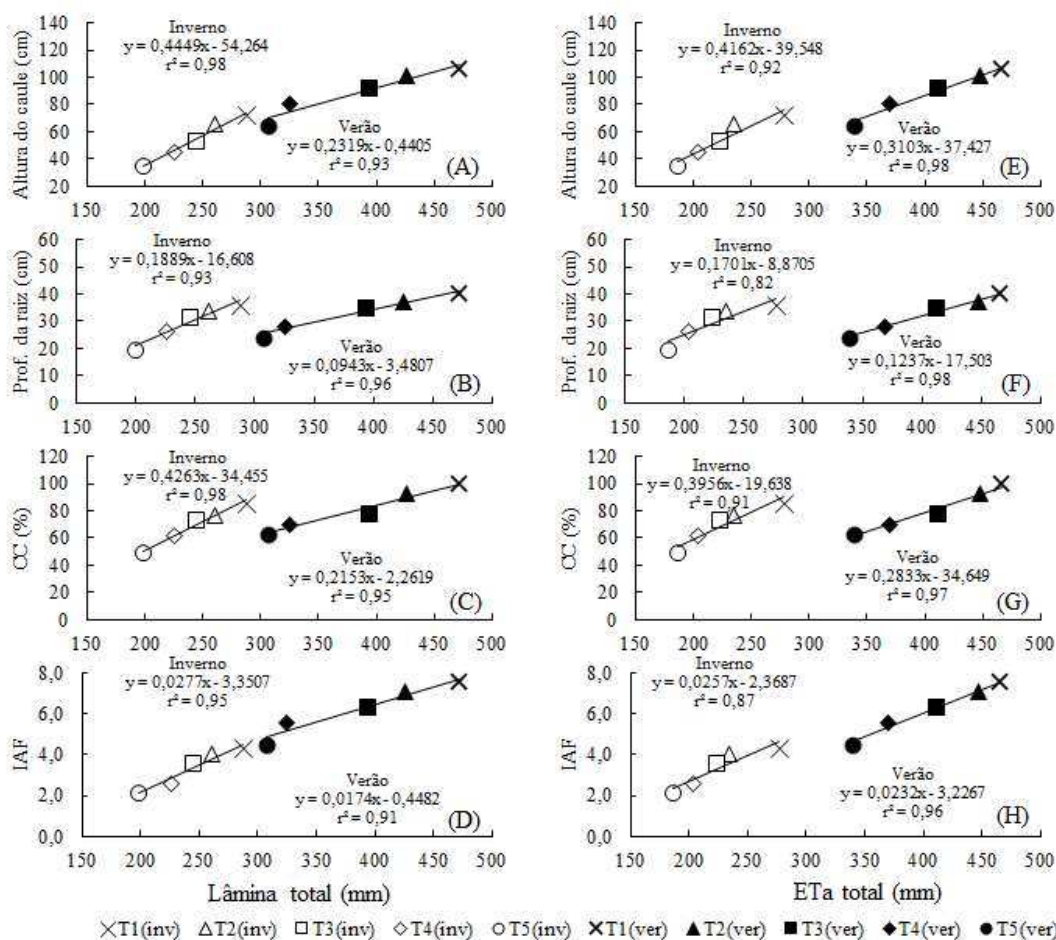


Figura 2. Altura do caule máxima (A), profundidade do sistema radicular máxima (B), percentual de cobertura máxima do solo (C) e índice de área foliar máximo (D) relacionadas com a lâmina total de água no solo e altura do caule máxima (E), profundidade do sistema radicular máxima (F), percentual de cobertura máxima do solo (G) índice de área foliar máximo (H) relacionadas com a evapotranspiração atual acumulada para os tratamentos [T1: déficit hídrico 0 a 20% da água disponível no solo (AD); T2: 20-40% AD; T3: 40-60% AD; T4: 60-80% AD e T5: 80-100% AD)] nos experimentos de inverno e verão.

O comportamento de H (Figura 2A), Z (Figura 2B), CC (Figura 2C) e IAF (Figura 2D) foram similares entre os tratamentos, aumentando seus valores com o aumento da lâmina de irrigação, tanto para o experimento de inverno quanto para o experimento de verão.

Para todas os tratamentos e experimentos o r^2 variou entre 82 e 99%, demonstrando a acentuada correlação entre as variáveis estudadas quando submetidos a diferentes lâminas de irrigação (irrigação + precipitação efetiva). Só se observou precipitação no experimento de verão.

Com base na Figura 2A, pode-se constatar que para cada milímetro de aumento do déficit hídrico houve redução de 0,4 cm de H, no inverno, e 0,2 cm, no verão. Comportamento similar foi observada para a ETa, em que cada milímetro de redução implicou em uma diminuição de 0,4 cm de H, no inverno, e de 0,3 cm, no verão (Figura 2E).

Para Z, cada milímetro de aumento do déficit hídrico resultou na redução de 0,2 e 0,1 cm da profundidade do sistema radicular da soja, no inverno e verão, respectivamente (Figura 2B). Para a ETa, cada milímetro de redução implicou em 0,2 cm de diminuição de Z, no inverno, e 0,1 cm, no verão (Figura 2F).

O CC também apresentou redução para cada milímetro de aumento do déficit hídrico, com queda de 0,4% no inverno e 0,2% no verão (Figura 2C). A redução de cada milímetro da ETa também gerou queda de CC da ordem de 0,4 e 0,3%, no inverno e verão, respectivamente (Figura 2G).

Observou-se uma redução de cerca de 0,027 cm² na área foliar para cada milímetro de aumento do déficit hídrico, durante o experimento de inverno, e 0,017 cm² no verão (Figura 2D). A redução de cada milímetro da ETa também diminuiu a área foliar da cultura da soja da ordem de 0,025 cm², no inverno e 0,023 cm² no verão (Figura 2H).

Liu e Dai (2020), estudando impactos das mudanças climáticas e medidas de manejo da cultura na fenologia da soja, observaram que a temperatura média do ar e o número de horas de luz são as variáveis relacionadas ao clima mais importantes, enquanto, para as medidas de manejo, a fenologia foi mais influenciada pela data de semeadura e pela cultivar utilizada. Montoya *et al.* (2017) observaram redução do IAF da soja com a diminuição do conteúdo de água no solo, enquanto Gava *et al.* (2016) observaram diminuição da altura do caule da soja com o aumento do déficit de água no solo, e que o déficit de 25% diminuiu em 21% a altura da planta, enquanto o déficit de 50% reduziu 36%. Nunes *et al.* (2016) estudando duas cultivares de soja submetidas a diferentes déficits hídricos, observaram redução na área foliar da soja da ordem de 80 e 52%, para duas cultivares diferentes submetidas a um déficit de 75%.

Produtividade da cultura da soja relacionada com a lâmina total de água no solo e evapotranspiração atual total

Na Figura 3 é apresentada a variação da produtividade da cultura da soja em função do aumento do déficit de água no solo (T1 para T5). Observa-se diferença

estatística significativa nos valores da produtividade entre os tratamentos, nos dois experimentos, com CV = 7,64% no inverno e 1,79% no verão. Dentre os tratamentos, mesmo apresentando diferença estatística na ETa, lâmina total de irrigação e fenologia da cultura, a produtividade entre os tratamentos T1 e T2 não apresentou diferença estatística pelo teste Tukey ($P < 0,05$), para o experimento de inverno e verão. No experimento de inverno também não se observou diferenças estatísticas entre os tratamentos T2 e T3, e T4 e T5.

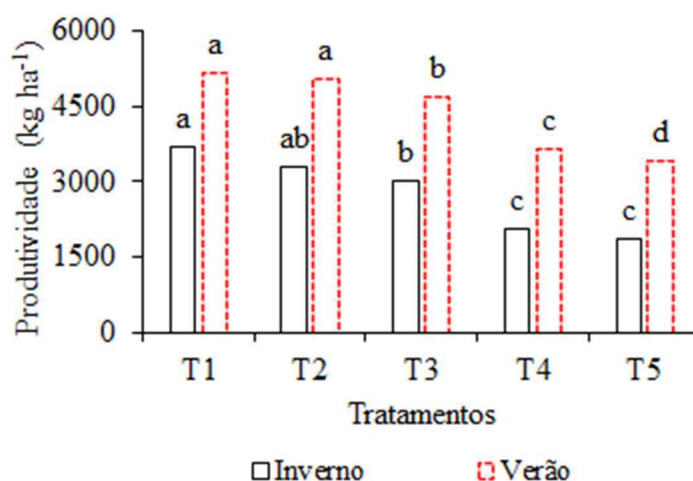


Figura 3. Médias da produtividade da soja para os tratamentos [T1: déficit hídrico 0 a 20% da água disponível no solo (AD); T2: 20-40% AD; T3: 40-60% AD; T4: 60-80% AD e T5: 80-100% AD)] nos experimentos de inverno e verão. Médias seguidas de letras diferentes nas colunas ou nas barras diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Com o aumento do déficit hídrico, a soja, nos tratamentos T2, T3, T4 e T5, quando comparados ao tratamento T1 (0 a 20% de déficit), no inverno, apresentou queda de produtividade da ordem de 11, 19, 45 e 50%. No experimento de verão, a queda de produtividade foi menor, sendo da ordem de 2, 9, 29 e 34% para os tratamentos T2, T3, T4 e T5, respectivamente, em relação ao tratamento T1. Possivelmente, um dos motivos para a diferença da produtividade ser menor entre os tratamentos no verão foi decorrente das chuvas (Figura 3).

Comparando-se T2 com T1 (Figura 3), observou-se uma redução da lâmina total de irrigação, em T2, da ordem de 26 mm, no inverno, e de 46 mm, no verão, e queda na produtividade de 410 kg ha⁻¹, no inverno, e de 110 kg ha⁻¹, no experimento de verão. Considerando uma área irrigada de 100 ha, com o aumento do déficit de T1

para T2 deixaram de ser aplicados durante os 90 dias de cultivo um volume de água equivalente a 26.000 m³ no inverno, e a 46.000 m³, nos 107 dias no verão, para uma diminuição de produtividade de 11 e 2%, respectivamente. Em termos de produtividade de uso da água observou-se uma redução de 5%. Isto indica, entre outros fatores, a importância da data de semeadura na economia de água e na produtividade da cultura.

Ainda analisando a Figura 3, observa-se que a redução na produtividade entre os tratamentos T1 e T2, e T2 e T3 foi menor que a observada entre T3 e T4 (déficit de 40 a 80%), voltando a apresentar menor queda entre os tratamentos T4 e T5. Esse comportamento foi verificado nos experimentos de inverno e verão. Tal constatação permite inferir que, quando necessário, é possível reduzir a lâmina de irrigação em até 60% sem que haja grandes reduções na produtividade. É evidente que deve, também, ser levado em consideração o estágio de desenvolvimento em que a cultura se encontra no momento em que déficit hídrico ocorre. Estudos indicam que a soja é mais sensível ao déficit hídrico do estágio R1 a R8 (GAJIĆ *et al.*, 2018; MONTTOYA *et al.*, 2017; NUNES *et al.*, 2016).

Esse comportamento também foi observado na Figura 4, quando foram ajustados modelos entre a produtividade da cultura da soja, para os experimentos de inverno e verão, em função da ETa total (Figura 4A) e da lâmina de irrigação total aplicada (Figura 4B), para os tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5.

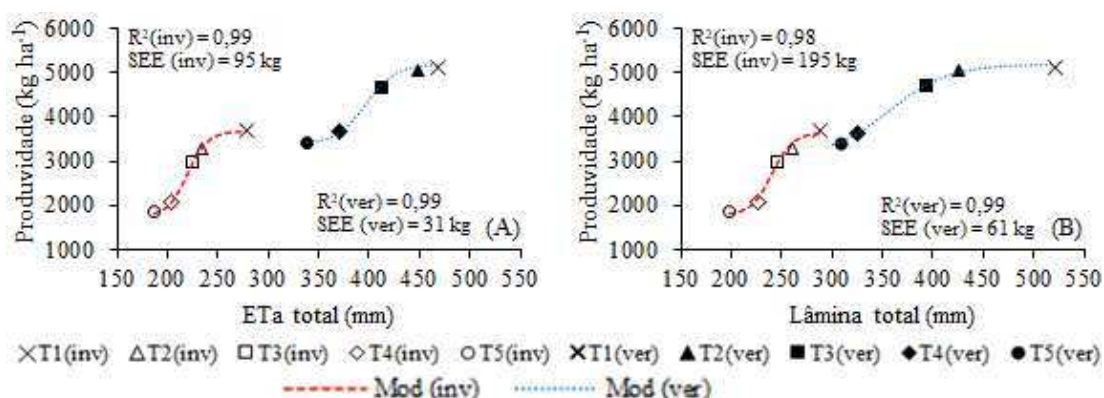


Figura 4. Produtividade da soja, durante os experimentos de inverno e de verão, em função da evapotranspiração atual total (ETa total) (A) e da lâmina de irrigação total aplicada (B) para os tratamentos [T1: déficit hídrico 0 a 20% da água disponível no solo (AD); T2: 20-40% AD; T3: 40-60% AD; T4: 60-80% AD e T5: 80-100% AD)], nos experimentos de inverno e verão.

Nessas condições, para os dois experimentos, a produtividade da soja em função da ETa total e da lâmina de irrigação total aplicada se ajustou a um modelo sigmoidal com quatro parâmetros, conforme equação.

$$P = Y_0 + \frac{\alpha}{1 + e^{-\left(\frac{X - X_0}{b}\right)}} \quad (5)$$

em que: $Y_0 = 1.760$ e 5.182 , $\alpha = 1.956$ e -1.793 , $X_0 = 220$ e 396 , $b = 10$ e -15 , para X = evapotranspiração atual total, para os experimentos de inverno e verão, respectivamente; e $Y_0 = 1.787$ e 3.102 , $\alpha = 1.878$ e 2.083 , $X_0 = 241$ e 357 , $b = 10$ e 29 , para X = lâmina de irrigação total aplicada, para os experimentos de inverno e verão, respectivamente;

Para a ETa total, nos experimentos de inverno e verão, o r^2 apresentou valor médio de 99%. O modelo superestimou a produtividade em 95 kg ha^{-1} de grãos de soja, para o inverno, e em 31 kg ha^{-1} para o verão, para cada hectare.

Para a lâmina total de irrigação, os valores de r^2 foram na ordem de 98 e 99% para os experimentos de inverno e verão, respectivamente. Nesse caso, o modelo superestimou a produtividade de soja em 195 kg ha^{-1} de grãos, para o inverno, e em 61 kg ha^{-1} para o verão, para cada hectare.

Os valores de PA foram maiores nos tratamentos T1, T2 e T3, tanto no inverno quanto no verão. No inverno, os valores de PA variaram entre $1,0$ (T4 e T5) e $1,4 \text{ kg m}^3$ (T2); já no verão, PA variou entre $1,0$ (T4 e T5) e $1,1 \text{ kg m}^3$ (T1, T2 e T3). Mesmo submetida a um déficit hídrico entre 20 a 40%, a soja, no tratamento T2, no experimento de inverno, foi a que apresentou maior rendimento por m^3 de água aplicado. Considerando uma área irrigada de 100 ha e comparando os valores de PA no tratamento T2 com T1, nota-se uma economia de aproximadamente 26.000 m^3 de água.

Para Gajić *et al.* (2018) o alto rendimento da soja é obtido com valores de evapotranspiração real acima de 380 mm por ciclo, corroborando os resultados obtidos neste trabalho, onde foram obtidos baixos rendimentos no inverno e altos rendimentos no verão. Os mesmos autores ainda afirmaram que para se ter altos rendimentos, a soma de precipitação (precipitação efetiva) com a irrigação deve estar entre 350 e 400 mm.

Zhang *et al.* (2018), para obtenção de altos rendimentos da cultura da soja, obtiveram valores de irrigação variando entre 110 e 405 mm, para diferentes tipos de

solos e condições climáticas, na região irrigada úmida no Mississippi, EUA, resultados condizentes com os deste estudo, principalmente no inverno. No verão, a máxima produtividade foi obtida com lâminas maiores que 405 mm.

A diferença da produtividade da soja e da PA quanto a época de cultivo (inverno ou verão) foi decorrente das características do clima, principalmente do número de horas de luz e da temperatura, tendo em vista que a soja é uma cultura fototérmica (LIU; DAI, 2020).

2.1.4 Conclusões

A aplicação de déficit de água no solo de 80 a 100%, quando comparada a aplicação de déficit de 0 a 20%, reduziu pela metade, de forma geral, a altura média da planta, a profundidade do sistema radicular, o índice de área foliar e o máximo percentual de cobertura do solo, para o inverno; no verão a redução foi menor.

Tanto no inverno quanto no verão, mesmo sem restrição hídrica, recomenda-se aplicar déficit de água no solo de 20 a 40%, sem queda de produtividade.

No verão, em situações de restrição hídrica, é possível ter produtividade da ordem de 70% aplicando déficit de água no solo variando de 60 a 80%.

2.1.5 Agradecimentos

Este estudo teve apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Distrito Federal (projeto Termo de Outorga 541/2016 FAPDF), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA Cerrados - projeto 20.18.01.015.00.06.006), Universidade Federal de Viçosa (UFV) e em parte, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - código financeiro 001, e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Bolsa número 870171 / 1997-6.

2.1.6 Referências

AGROSATÉLITE, ABIOVE. **Análise geoespacial da dinâmica da soja no bioma Cerrado: 2014 a 2017**. Florianópolis, SC, 2018.

ALLEN, R. G. *et al.* **Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56**. Roma, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.

ANDA, A. *et al.* Yield features of two soybean varieties under different water supplies and field conditions. **Field Crops Research**, v. 245, p. 107673, 1 jan. 2020.

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

CONAB. **Conab - Safra Brasileira de Grãos, V. 7 - SAFRA 2019/20**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>>. Acesso em: 5 ago. 2020.

GAJIĆ, B. *et al.* Effect of irrigation regime on yield, harvest index and water productivity of soybean grown under different precipitation conditions in a temperate environment. **Agricultural Water Management**, v. 210, p. 224–231, 30 nov. 2018.

GAVA, R. *et al.* Estratégias de manejo de déficit hídrico na irrigação da cultura da soja. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 10, n. 3, p. 305–315, 29 set. 2016.

JHA, P. K.; KUMAR, S. N.; INES, A. V. M. Responses of soybean to water stress and supplemental irrigation in upper Indo-Gangetic plain: Field experiment and modeling approach. **Field Crops Research**, v. 219, p. 76–86, 15 abr. 2018.

LEAMER, R. W.; SHAW, B. A Simple Apparatus for Measuring Noncapillary Porosity on an Extensive Scale 1. **Agronomy Journal**, v. 33, n. 11, p. 1003–1008, 1 nov. 1941.

LIU, Y.; DAI, L. Modelling the impacts of climate change and crop management measures on soybean phenology in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 262, p. 121271, 20 jul. 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.

MESQUITA, R. O. *et al.* Physiological approach to decipher the drought tolerance of a soybean genotype from Brazilian savana. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 151, p. 132–143, 1 jun. 2020.

MONTOYA, F. *et al.* 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, 1 nov. 2017.

NUNES, A. C. *et al.* Aspectos agronômicos de plantas de soja submetidas a déficit hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 7, p. 654–659, jul. 2016.

OLIVEIRA, L. B. DE. Determinação da macro e microporosidade pela “mesa de tensão” em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 3, n. 1, p. 197–200, 1968.

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.

RICHARDS, L. A. Pressure membrane apparatus - Construction and use. **Agronomy Engineering**, v. 28, p. 451–454, 1947.

SILVA, E. H. F. M. *et al.* Soybean irrigation requirements and canopy-atmosphere coupling in Southern Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 218, p. 1–7, 1 jun. 2019.

SILVA, L. P. *et al.* Estimativa da produtividade de soja usando irrigação na época das chuvas no bioma Cerrado. **Agrometeoros**, v. 28, n. 0, 8 jul. 2020.

SOUSA, D. DE; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. **Planaltina: Embrapa Cerrados**, v. 416, 2004.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. [s.l.] Brasília, DF: Embrapa, 2017., 2017.

WANG, C. *et al.* Impacts of Drought on Maize and Soybean Production in Northeast China During the Past Five Decades. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 7, 03 2020.

ZHANG, B. *et al.* 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, 31 maio 2018.

2.2 Artigo 2 – Modelos para estimativa da evapotranspiração atual da cultura da soja em condições de déficit hídrico.

Resumo: A soja, principal commodity agrícola brasileira, tem sido cada vez mais cultivada em sistemas irrigados, o que tem contribuído para aumentar a demanda de água na região do Cerrado brasileiro que já enfrenta problemas hídricos em algumas de suas principais bacias hidrográficas. Existem diversos métodos e instrumentos que podem ser utilizados para manejar um sistema de irrigação, sendo os mais utilizados aqueles que se baseiam na estimativa da evapotranspiração atual (ETa), que é também a principal fonte de erro desses métodos de manejo. Essa constatação é ainda mais evidente quando se considera as novas cultivares de soja que são lançadas anualmente no mercado brasileiro. No presente trabalho objetivou-se avaliar diferentes concepções matemáticas utilizadas na estimativa da evapotranspiração atual de uma nova cultivar da cultura da soja (BRS 7581RR) submetida a diferentes condições de déficit hídrico. Para isto, foram conduzidos dois experimentos de campo no ano de 2019, sendo um no inverno e outro no verão. Foram avaliadas a ETa estimada pelos modelos FAO56 Dual (ETa_{DUAL}), modelo de Jensen e Hermann (ETa_{JEN}), AquaCrop (ETa_{ACRP}) e Ritchie (ETa_{RIT}) em comparação a ETa determinada pelo método gravimétrico (referência). O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados com cinco tratamentos (T1, T2, T3, T4 e T5) e quatro repetições. O manejo da irrigação nos tratamentos foi conduzido de forma a manter diferentes níveis de déficits hídricos no solo. T1: déficit hídrico de 0 a 20% da água disponível no solo (AD); T2: 20 a 40% da AD; T3: 40 a 60% da AD; T4: 60 a 80% da AD; e T5: 80% a 100%. Os resultados mostraram que o modelo ETa_{DUAL} apresentou melhor desempenho na estimativa da ETa da soja para as condições de inverno em grande parte dos tratamentos, com NSE variando entre 0,42 a 0,83. No verão, o modelo ETa_{JEN} foi o que apresentou os melhores resultados, com NSE variando entre 0,70 a 0,94. Dentre os modelos, ETa_{RIT} foi o que apresentou pior desempenho na estimativa da ETa, para a maior parte dos tratamentos e nas duas épocas de estudo.

Palavras-chave: manejo de irrigação, Cerrado, recursos hídricos, modelagem.

2.2.1 Introdução

O Brasil desempenha um papel importante na produção mundial de alimentos, destacando-se como produtor e exportador de várias commodities agrícolas, com

destaque para a cultura da soja. Mais da metade da área cultivada com soja no Brasil na safra de 2019/20, estava concentrada no bioma Cerrado (AGROSATÉLITE, 2020). O Cerrado, segundo maior bioma em extensão e principal fronteira agrícola, é uma região estratégica para a manutenção do equilíbrio hidrológico no Brasil.

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 localizada nesta região (BRASIL, 2014), que concentra aproximadamente 80% de todos os pivôs centrais (ALTHOFF; RODRIGUES, 2019).

Na região do Cerrado, os longos períodos de estiagens recentemente observados, aliados ao rápido desenvolvimento econômico da região, à falta de monitoramento de variáveis hidroclimáticas e de uma adequada gestão de recursos hídricos, têm contribuído para ocorrência de escassez hídrica. Neste contexto, é importante desenvolver estratégias para reduzir a quantidade de água retirada dos mananciais pelos diversos usos, o que pode ser viabilizado por meio de um planejamento integrado de bacia hidrográfica, que estabeleça estratégias efetivas para aumentar a eficiência dos diversos usos, principalmente da irrigação, que é a principal usuária.

Qualquer estratégia que objetive melhorar a eficiência de irrigação deve priorizar o ajuste do manejo. Na literatura, pode-se encontrar a descrição de diversos métodos (ALLEN *et al.*, 1998; DOORENBOS; PRUITT, 1977; TORRES *et al.*, 2019) e instrumentos (CONTRERAS *et al.*, 2017; GONÇALVES *et al.*, 2019; QI *et al.*, 2020; ZHENG *et al.*, 2020) que podem ser utilizados para manejar um sistema de irrigação. Os modelos matemáticos que consideram as características do clima, do solo e da planta (CHIBARABADA; MODI; MABHAUDHI, 2020; ER-RAKI *et al.*, 2010; JENSEN; HEERMANN, 1970; PAREDES *et al.*, 2015; RODRIGUES *et al.*, 2005) para definir quando e quanto irrigar são, em geral, a opção de mais fácil operacionalização em campo.

Dentre os modelos existentes, aquele proposto por Doorenbos e Pruitt (1977) que estima a evapotranspiração potencial da cultura (ET_c) por meio da relação entre a evapotranspiração de uma cultura de referência (ET_o) e um coeficiente de cultura (K_c), pela sua simplicidade e facilidade de programação e de operacionalização, tem sido o mais utilizado. A ET_o representa a demanda atmosférica, diferindo entre localidades.

Já o K_c varia de acordo com a cultura, o seu estágio de desenvolvimento e com o clima (ALLEN *et al.*, 1998).

Para o cálculo da evapotranspiração atual da cultura (ET_a), com base nos procedimentos que utilizam o K_c , o mais usual é corrigir o valor da ET_c em função de um coeficiente de estresse hídrico da cultura (K_s), que é função da umidade do solo, e de um coeficiente que considera a evaporação do solo (K_e), que é função da cobertura vegetal e da frequência de umedecimento do solo (ALLEN *et al.*, 2006; JENSEN; HEERMANN, 1970; PEREIRA *et al.*, 2013).

Outras abordagens que apresentam grande potencial de aplicação, são aquelas baseadas em metodologias que estimam a ET_a por meio do cálculo individualizado da transpiração e da evaporação direta da água do solo (E_a), como o modelo de Jensen e Heermann (Jensen e Heermann, 1970), modelo de Ritchie (1972), FAO56 Dual e AquaCrop (HSIAO *et al.*, 2009; RAES *et al.*, 2009; STEDUTO *et al.*, 2009). Essas abordagens são, também, úteis na gestão de bacias hidrográficas, pois possibilitam investigar a magnitude da E_a , que é considerada uma perda de água não benéfica para o sistema, ou seja, essa água não contribui efetivamente para a produção.

Os modelos de Jensen e Heermann, assim como FAO56 Dual, calculam a ET_a com base nos coeficientes K_s , K_e e de um coeficiente de cultura basal (K_{cb}). No modelo AquaCrop, a transpiração é calculada em função da cobertura vegetal e da ET_o ; já para o modelo de Ritchie, a transpiração é calculada em função do índice de área foliar e da evapotranspiração máxima da cultura. Para os dois últimos modelos, o cálculo da evaporação é feito considerando as duas fases de evaporação de água no solo.

Diversos autores estudaram o comportamento desses modelos na estimativa da ET_a em diversas regiões do mundo. Rodrigues *et al.* (2005, 1997), estudando o modelo de Ritchie (1972), obtiveram sucesso na estimativa da ET_a para as culturas da cevada e do feijão, respectivamente. Alves *et al.* (2020) obtiveram bons resultados na utilização do modelo de Jensen e Heermann (1970) para avaliar o impacto das condições do clima e da planta na lâmina irrigada para a cultura do milho. O AquaCrop também apresentou bons resultados na estimativa da ET_a para a cultura da soja (MBANGIWA; SAVAGE; MABHAUDHI, 2019) e cevada (PEREIRA *et al.*, 2015). O modelo FAO56 Dual, utilizado por Jiang *et al.* (2019) e Paredes *et al.* (2018), também apresentou bom desempenho para estimativa da ET_a .

Apesar dessas metodologias para estimativa da ETa serem bem conhecidas e já terem sido aplicadas em várias regiões do mundo (BELLO; WALKER, 2017; RODRIGUES *et al.*, 1997b; TAN *et al.*, 2018), pouco tem sido feito para as condições da região do Cerrado brasileiro e menos ainda para as novas variedades de soja que são lançadas anualmente no mercado brasileiro.

A região do Cerrado enfrenta sérios problemas hídricos em algumas de suas principais bacias hidrográficas, sendo necessário desenvolver coeficientes técnicos de irrigação para as novas variedades de cultura e melhorar o manejo de irrigação, por meio de melhores estimativas da ETa. Assim, no presente trabalho objetivou-se avaliar o desempenho de diferentes concepções matemáticas para estimativa da evapotranspiração atual de uma nova cultivar de soja (BRS 7581RR) submetida a diferentes condições de déficit hídrico.

2.2.2 Material e métodos

Área de estudo

Para avaliação da produtividade e das características biométricas das plantas da soja, considerando diferentes estratégias de irrigação, foram instalados experimentos em duas estações do ano (inverno e verão), com a cultura de soja cultivar BRS 7581RR (tipo indeterminado), na Unidade de Referência em Manejo de Água (URMA), localizada no Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Embrapa Cerrados). Com elevação de 979 m, a URMA está localizada na região do Planalto Central do Bioma Cerrado (15°35'55.1"S, 47°42'27.4"O).

O clima da região é classificado como As (ALVARES *et al.*, 2013) 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; DA SILVA; EVANGELISTA, 2010). O solo da área é classificado como Latossolo vermelho, contendo 52% de argila.

Delineamento experimental

Os experimentos foram conduzidos 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.

Em cada tratamento, foi aplicado uma estratégia de irrigação com base na água disponível no solo (AD). O tratamento T1 foi conduzido com déficit hídrico variando

de 0 a 20% da AD; no tratamento T2, a variação permitida do déficit hídrico foi de 20 a 40% da AD; no tratamento T3 foi de 40 a 60% da AD; em T4 foi de 60 a 80% da AD; e de 80% a 100% da AD, em T5.

Manejo da irrigação e medição da umidade do solo

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. O coeficiente uniformidade de Christiansen (CUC) realizado na área foi de 90%, e a eficiência de aplicação de água do sistema de irrigação foi igual a 85%.

A lâmina de irrigação aplicada em cada tratamento foi calculada com base no valor da umidade no limite superior de cada tratamento, por meio da equação

$$LA = \frac{10 (\theta_{LS}[T1, T2, T3, T4 \text{ ou } T5] - \theta_{\text{atual}}[T1, T2, T3, T4 \text{ ou } T5])}{Ef} Z \quad (1)$$

em que: LA = lâmina de irrigação aplicada em cada tratamento, mm; θ_{LS} = umidade do solo no limite superior do tratamento, m³ m⁻³; θ_{atual} = umidade atual do solo em cada tratamento (T1, T2, T3, T4 ou T5), m³ m⁻³; Z = profundidade do sistema radicular da cultura, cm; e Ef = eficiência de aplicação de água do sistema de irrigação (Ef = 0,85).

A irrigação era aplicada quando a umidade do solo medida na zona radicular da cultura atingia a faixa de valor pré-estabelecido em cada unidade experimental. 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 a obtenção do peso úmido e seco, obtinha-se a umidade atual do solo e procedia-se os cálculos da lâmina de irrigação a ser aplicada em cada tratamento.

A profundidade do sistema radicular da cultura foi avaliada semanalmente em todos os tratamentos para os experimentos de inverno e verão. Para isto, retirava-se aleatoriamente quatro plantas na área de cada unidade experimental e media-se o comprimento máximo da raiz. A retirada da planta foi realizada utilizando uma pá reta,

com comprimento de 40 cm. Como o solo estava sempre úmido, mesmo nas áreas com estresse, houve facilidade da retirada raízes.

Para viabilizar o manejo diário da irrigação, ajustou-se, aos dados observados, o modelo sigmoidal com três parâmetros.

Demais dados coletados

Os elementos meteorológicos necessários para alimentar os modelos foram obtidos da estação meteorológica da Embrapa Cerrados, localizada a aproximadamente 2 km do experimento. Foram utilizados dados de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar.

A precipitação, devido a sua variabilidade, foi medida por meio de dois pluviômetros instalados na área experimental. A evapotranspiração de referência foi calculada pela equação FAO-Penman Monteith (ALLEN *et al.*, 1998).

Para avaliação da textura do solo, da curva de retenção de água no solo e da densidade aparente foram coletadas dezoito amostras de solo nas camadas de 0-20 e 20-40 cm. Para estimativa da textura, utilizou-se o procedimento definido por Teixeira *et al.* (2017). Na construção da curva retenção utilizou-se a metodologia da mesa de tensão (Leamer e Shaw, 1941; Oliveira, 1968) para os pontos de 1, 3, 6, 10, 33, 60 kPa e panela de Richards (RICHARDS, 1947) para 800 e 1500 kPa. Para a densidade aparente foi utilizado o método do anel volumétrico (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

O índice de área foliar (IAF) foi calculado pela razão entre área foliar por planta e a densidade de plantio. Para estimativa da área foliar da planta foram coletadas, na frequência de dez dias, oito plantas por tratamento. Após a coleta, as plantas foram acondicionadas em sacos plásticos e levadas ao Laboratório de Biologia Vegetal da Embrapa Cerrados, onde as folhas das plantas foram separadas e a área foliar calculada por meio de um planímetro eletrônico (LI-3100C). O IAF foi calculado para todos os tratamentos para os experimentos de inverno e verão. Para viabilizar a modelagem diária da ETa, ajustou-se aos dados observados, o modelo Gaussiano de Peak com três parâmetros.

Manejo da cultura

Com base no resultado da análise química do solo da área experimental foi realizada a adubação para a cultura da soja, aplicando-se no sulco de semeadura 22,5

kg de N; 112,5 kg de P_2O_5 e 112,5 kg de K_2O por hectare, conforme recomendação de Sousa e Lobato (2004).

A semeadura foi realizada no dia 06 de maio (inverno) e 09 de setembro (verão) de 2019 com a cultivar BRS 7581RR, utilizando 18 sementes por metro linear e espaçamento de 0,5 m entre linhas, equivalente a uma população de 360.000 plantas ha^{-1} . A colheita foi realizada em 09 de agosto e 25 de dezembro de 2019, respectivamente.

Após a semeadura foram aplicadas lâminas de irrigação com o objetivo de manter o solo úmido e assim garantir a germinação e emergência das plântulas. As lâminas foram aplicadas até 10 dias após a semeadura (DAS). A partir do 13 DAS, iniciou-se o monitoramento para aplicação de cada estratégia que foi finalizado aos 90 DAS, no experimento de inverno, e aos 107 DAS, no de verão.

Durante a condução do experimento foram realizados os tratamentos fitossanitários necessários, com aplicação de herbicida, fungicida e inseticida.

Estimativa da evapotranspiração atual

A evapotranspiração atual considerada como referência foi calculada com base na variação da umidade do solo estimada pelo método gravimétrico (ET_{aGRA}) e estimada pelos modelos FAO 56 Dual (ET_{aDUAL}), Jensen e Heermann (ET_{aJEN}), AquaCrop (ET_{aACRP}) e Ritchie (ET_{aRIT}).

A ET_{aGRA} foi calculada por meio das equações

$$ET_{a\ 0-40cm} = A + B, \text{ para } 0 \leq Z \leq 40 \quad (2)$$

$$A = 10 [(\theta_{1i\ 0-20cm} - \theta_{2i-1\ 0-20cm}) D_i] \quad (3)$$

$$B = 10 [(\theta_{1i\ 20-40cm} - \theta_{2i-1\ 20-40cm}) D_i] \quad (4)$$

em que: θ_{1i} = umidade volumétrica no dia i , $m^3\ m^{-3}$; θ_{2i} = umidade volumétrica no dia $i-1$, $m^3\ m^{-3}$; D_i = espessura da camada, cm (20 cm). Para $Z \leq 20$, $B = 0$.

A ET_{aDUAL} e a ET_{aJEN} foram calculadas conforme procedimento descrito por Allen *et al.* (1998) e Jensen e Heermann (1970), respectivamente, conforme a equação

$$ET_a = ET_o (K_s K_{cb} + K_e) \quad (5)$$

Para os dois modelos, a transpiração da planta é calculada por meio de um coeficiente de cultura basal e de um coeficiente para representar o estresse hídrico da cultura. A evaporação do solo é representada por meio de um coeficiente de evaporação. Para os valores de K_{cb} foram utilizados os procedimentos descritos no boletim FAO 56, para os estudos de inverno e verão. A diferença entre os modelos está no cálculo do K_s e K_e . Enquanto o ET_{ADUAL} adota um comportamento linear, calculado em função da quantidade de água armazenada no solo, para redução do K_s , a ET_{AJEN} utiliza um modelo logarítmico. No caso do K_e , a ET_{ADUAL} considera as duas fases de secamento e a cobertura do solo pela cultura e a ET_{AJEN} , utiliza as seguintes equações de K_e para o primeiro, segundo e terceiro dias após uma chuva ou irrigação, respectivamente, $(0,9 - K_{cb}) 0,8$; $(0,9 - K_{cb}) 0,5$; $(0,9 - K_{cb}) 0,3$.

ET_{RIT} foi calculada conforme procedimentos descritos por Ritchie (1972), Ritchie e Johnson (1990) e Jones e Ritchie (1990). Em sua formulação básica, o modelo de Ritchie calcula a evaporação direta da água no solo separada de T , que foi calculada em função da evapotranspiração máxima (ET_{MAX}) e do IAF.

No cálculo da E_s , considera-se as duas primeiras fases de evaporação direta da água do solo descritas por Philip (1957). A primeira fase é caracterizada por uma evaporação relativamente elevada e controlada pelas condições atmosféricas. A segunda fase inicia-se a partir do instante em que a taxa de E_s não for suficiente para à demanda atmosférica. O parâmetro U corresponde a quantidade de água que evapora na fase 1, enquanto α é uma constante equivalente a difusividade da água na superfície do solo durante a fase 2 de secagem.

Para estimativa dos valores dos parâmetros U e α foram instalados na área experimental, por um período de vinte e cinco dias, oito microlisímetros de pesagem com diâmetro interno igual a 150 mm. O manejo dos microlisímetros, assim como a estimativa dos parâmetros U e α , seguiram os procedimentos descritos por Rodrigues *et al.* (2005).

ET_{ACROP} foi calculada conforme procedimentos descritos por Hsiao *et al.* (2009), Raes *et al.* (2009) e Steduto *et al.* (2009). A transpiração é calculada em função da fração da área do solo coberta pelo dossel da cultura e da ET_o , conforme a equação proposta por Allen *et al.* (1998).

$$T = CC * K_{C_{TR,x}} ET_o \quad (6)$$

em que: CC^* = cobertura do solo pelo dossel da cultura ajustada para microadvecção, $m^2 m^{-2}$; e $K_{cTR, x}$ = coeficiente da cultura em condições de cobertura completa do solo, adimensional.

O percentual de cobertura do solo (CC) foi estimado semanalmente por meio do aplicativo Canopeo (PATRIGNANI; OCHSNER, 2015). O cálculo da E_s é feito de maneira similar ao modelo ET_{ADUAL} e ET_{ARIT} , considerando e adaptando as duas fases de evaporação da água no solo descritas por Allen *et al.* (1998), sendo que a influência da cobertura do solo se baseia em CC^* .

Análise do desempenho dos modelos

Para avaliar o desempenho dos modelos relacionados foram utilizados o coeficiente de determinação (r^2), o índice de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash e Sutcliffe, 1970), erro de viés médio (MBE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) (Richter *et al.*, 2011; Willmott e Matsuura, 2005).

O erro de viés médio indica quando um modelo está subestimando ou superestimando as observações, enquanto a raiz do erro quadrado médio indica as diferenças entre os valores previstos e os valores observados. O índice de Nash-Sutcliffe varia entre $-\infty$ e 1, em que 1 corresponde a uma combinação perfeita entre os valores observados e modelados, já valores menores e iguais a zero indicam que as previsões do modelo são tão precisas quanto a média dos dados observados (Schaeffli e Gupta, 2007). Para Collischonn (2001), valores de NSE entre 0,36 e 0,75 remetem a desempenho aceitável dos modelos, já os modelos com valores acima de 0,75 apresentam desempenho adequado e bom.

2.2.3 Resultados e discussões

Dados climatológicos

Na Figura 1 está apresentado o comportamento das variáveis meteorológicas referentes aos dois experimentos com a soja. No experimento de inverno (Figura 1A), observou-se uma variação nos valores de temperaturas mínima e máxima de 8 a 18,5 °C e de 22,5 a 32 °C, respectivamente. Já no experimento de verão (Figura 1B), as variações nessas variáveis climáticas foram de 13,5 a 21 °C e de 26,2 a 37 °C, respectivamente. No experimento de inverno, a temperatura térmica acumulada (TTA) foi igual a 838 °C, aproximadamente 38,5% menor que o valor obtido no experimento

de verão. O número de horas de luz no dia foi maior no verão da ordem de 30% que no inverno.

No experimento de inverno a ETo variou entre 1,5 e 5,2 mm d⁻¹, enquanto que no de verão essa variação foi entre 1,9 e 7,1 mm d⁻¹. O valor da ETo acumulada durante o ciclo da cultura no experimento de inverno foi igual a 329 mm, cerca de 34% menor que o valor verificado no experimento de verão.

No experimento de inverno, no decorrer de todo o ciclo da cultura, observou-se três eventos de precipitação (9, 10 e 11 DAS), que ocorreram quando a cultura se encontrava na fase de emergência, totalizando 9,5 mm. No experimento de verão, por sua vez, a precipitação total foi de 418 mm, com maior concentração entre os 71 e 105 DAS, quando a cultura se encontrava na fase de desenvolvimento médio e final.

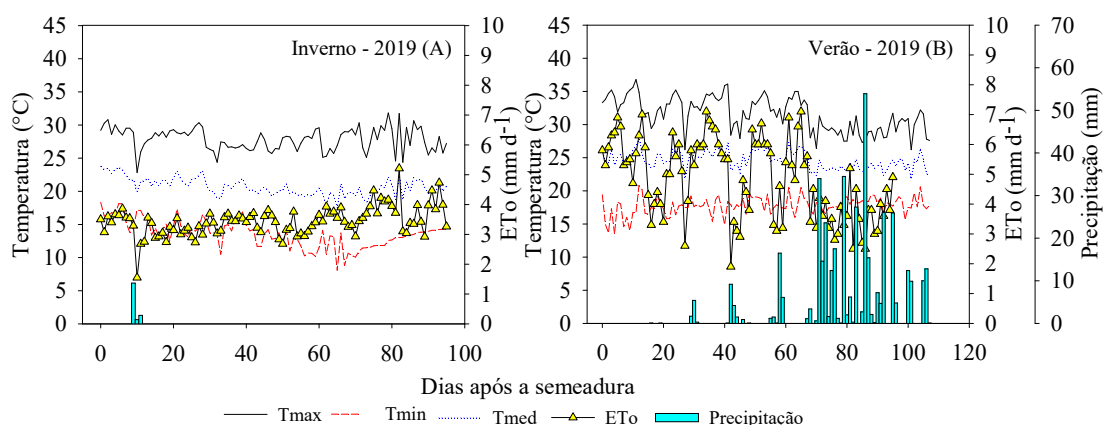


Figura 1. Temperaturas máxima (Tmax), média (Tmed) e mínima (Tmin) do ar, evapotranspiração de referência (ETo) e precipitação observadas nos experimentos de inverno (A) e de verão (B).

Dados da planta

Os valores dos três parâmetros do modelo sigmoidal, ajustado aos dados de crescimento radicular para cada um dos tratamentos dos experimentos de inverno e verão, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do modelo sigmoidal, ajustado aos dados de crescimento radicular, para cada um dos tratamentos dos experimentos de inverno e verão para a cultura da soja.

Coef	Experimento de inverno					Experimento de verão				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
α	36,85	33,53	29,83	25,28	20,39	43,96	40,76	38,33	31,47	27,23
b	15,75	15,77	14,60	12,59	11,56	25,27	24,64	24,80	26,97	27,77
Xo	36,11	36,95	38,75	38,33	39,51	39,60	39,93	41,95	44,58	45,64

Coef = coeficientes, α = crescimento radicular máximo, b = nível de espalhamento e Xo = ponto de inflexão da curva.

Analizando o comportamento do parâmetro α (Tabela 1), que representa o crescimento radicular máximo, observa-se uma redução do seu valor à medida que se aumenta o déficit hídrico no solo (T1 para T5), nos dois experimentos. A maior profundidade do sistema radicular foi observada em T1, no experimento de verão, que foi 14,3% maior que a profundidade das raízes observadas no experimento de inverno. No experimento de inverno, observou-se uma variação, de T1 para T5, igual a 45% e igual a 38%, no verão. A menor profundidade foi observada em T5, no experimento de inverno, sendo 20% inferior à profundidade máxima das raízes observadas em T5, no verão.

Esse resultado confirma ao que era esperado, ou seja, maiores profundidades nos tratamentos com maior déficit hídrico. Uma possível explicação é que nos tratamentos com maior déficit o volume de solo úmido era menor, observação comprovada através dos baixos valores de umidade das amostras gravimétricas retiradas durante os estudos. Desta forma, a baixa umidade limitou o volume de solo explorado pelas raízes em busca de água e nutrientes, limitando o aprofundamento da raiz.

No experimento de inverno, o parâmetro b, que representa nível de espalhamento dos dados, com exceção de T1 para T2, apresentou uma redução de valor com o aumento do déficit hídrico no solo. Esse comportamento, entretanto, não foi observado no experimento de verão.

O parâmetro Xo, que representa o ponto de inflexão da curva, ou seja, ponto no qual ocorre a taxa máxima de variação da função, no experimento de inverno, variou entre os 36 e 40 DAS, para todos os tratamentos, enquanto, no experimento de

verão, foi dos 39 as 45 DAS. Em ambos os experimentos, o maior valor de X_o foi observado no tratamento T5.

Os valores dos três parâmetros do modelo Gaussiano de Peak, ajustado aos dados de IAF, para cada um dos tratamentos dos experimentos de inverno e verão, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros do modelo Gaussiano de Peak, ajustado aos dados de IAF, para cada um dos tratamentos dos experimentos de inverno e verão, apresentados para a cultura da soja.

Coef	Experimento de inverno					Experimento de verão				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
α	4,54	4,20	3,70	2,63	2,17	7,90	7,44	6,60	5,66	4,53
b	19,05	18,71	18,88	19,51	20,07	22,24	21,69	21,82	21,20	21,19
X_o	72,4	72,6	72,3	71,6	70,6	74,1	74,1	74,6	73,6	73,5

α = crescimento foliar máximo, b = largura do pico da curva do modelo e X_o = posição do pico máximo no IAF em relação aos dias após a semeadura.

Observando o desempenho do IAF, evidenciado pelo parâmetro α (Tabela 2), analisa-se a redução do IAF à medida que se aumenta o déficit hídrico no solo (T1 para T5), nos dois experimentos. Os maiores valores de IAF foram observados nos tratamentos T1, sendo 72% maior no experimento de verão que no experimento de inverno. No experimento de inverno, observou-se uma variação, de T1 para T5, igual a 51% e igual a 40%, no verão. Os menores valores de IAF foram observados em T5, no experimento de inverno, sendo 52% inferior ao IAF observado em T5, no verão.

No experimento de inverno, o parâmetro b, que representa a largura do pico da curva do modelo, apresentaram pequena variação com o aumento do déficit de água no solo, para os experimentos de inverno e verão.

O Parâmetro X_o , que representa a posição do pico máximo no IAF em relação aos dias após a semeadura, demonstrou que os maiores valores de IAF foram atingidos entre os 70 e 73 DAS para o experimento de inverno e 73 e 75 DAS para o experimento de verão.

O aumento da restrição da água no solo influenciou na diminuição da área foliar da planta da cultura da soja, gerando copas menores, e menores demandas da evapotranspiração da cultura. O menor crescimento da área foliar nos tratamentos com maior restrição deixou o solo mais exposto a evaporação, aumentando, assim, a fração da E_a sobre a ET_a nestas condições.

Evapotranspiração atual acumulada

Os valores da ETa total calculada pelo método gravimétrico e pelos diferentes modelos para todos os tratamentos, para os experimentos de inverno e no verão, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Evapotranspiração atual total observada (ET_{GRA}) e estimada pelos modelos FAO56 Dual (ET_{DUAL}), Jensen e Heermann (ET_{JEN}), AquaCrop (ET_{ACRP}) e Ritchie (ET_{RIT}) da cultura da soja calculada para os tratamentos [T1: déficit hídrico 0 a 20% da água disponível no solo (AD); T2: 20-40% AD; T3: 40-60% AD; T4: 60-80% AD e T5: 80-100% AD)] nos experimentos de inverno (A) e verão (B).

Tratamento	Inverno					Verão				
	ET _{GRA}	ET _{DUAL}	ET _{JH}	ET _{ACRP}	ET _{RIT}	ET _{GRA}	ET _{DUAL}	ET _{JH}	ET _{ACRP}	ET _{RIT}
T1	312	299	253	270	299	466	515	425	492	458
T2	296	296	252	253	293	447	508	421	461	446
T3	277	290	249	249	294	412	495	412	431	459
T4	261	270	237	241	294	370	484	403	413	457
T5	236	255	229	219	294	339	470	390	394	446

Analisando o comportamento de cada modelo nos tratamentos do experimento de inverno, observa-se uma tendência de redução da ETa, exceto para o modelo ET_{RIT}, à medida que se aumenta o déficit de água no solo. A ET_{GRA}, no tratamento T5, apresentou redução de 32% quando comparada com T1. Já para T2, T3 e T4 a diminuição da ETa foi da ordem de 5, 13 e 19%, respectivamente, quando comparados a T1. A ET_{DUAL}, nos tratamentos T2, T3, T4 e T5, quando comparada a T1, apresentou diminuição de 1, 3, 11 e 17%, respectivamente. Analisando o modelo ET_{JEN}, observou-se uma redução de 1, 2, 7 e 11% em T2, T3, T4 e T5, respectivamente. O modelo ET_{ACRP}, nos tratamentos T2, T3, T4 e T5, apresentou reduções da ordem de 7, 9, 12 e 23%, respectivamente, quando comparados a T1. O modelo ET_{RIT}, nos tratamentos T1 e T2, apesar de apresentarem valores 4 e 1% menores que a ET_{GRA}, para T3, T4 e T5, os valores de ET_{RIT} foram 6, 13 e 24% maiores que a ET_{GRA}. Já entre os tratamentos, a diferença entre T1 e os demais tratamentos foi da ordem de 2%. Dentre os modelos, ET_{RIT} foi o que apresentou o pior desempenho, principalmente para os tratamentos T4 e T5.

No experimento de verão, avaliando os valores da ET_{GRA} e dos modelos, para todos os tratamentos, observou-se que a ET_{GRA} total variou entre os tratamentos T1 e

T5 da ordem de 38% e foi cerca de 6% maior que no experimento de inverno (Tabela 3). Para os demais tratamentos, a diferença foi igual a 4, 13 e 26% para T2, T3 e T4, respectivamente. Para o modelo ET_{ADUAL}, a diferença entre T1 e T5 foi de 10% e de 1, 4 e 6% para T2, T3 e T4, respectivamente. Comparando T1 e T5, em relação a ET_{AJEN}, observou-se uma redução da ordem de 9%, sendo cerca de 2% menor que o valor observado no experimento de inverno. Para os demais tratamentos, as diferenças entre a ET_{AJEN} e a ET_{AGRA} variaram entre 1 e 5%. O modelo ET_{ACRP}, de forma similar ao que foi observado no experimento de inverno, foi o que apresentou valores de variação da ETa total mais próximos aos valores ET_{AGRA}, sendo as diferenças entre T1 e T2, T3, T4 e T5 da ordem de 7, 14, 19 e 25%, respectivamente. Por fim, o modelo ET_{ARIT} se comportou de forma similar ao experimento de inverno com pequena variação entre os tratamentos, sendo a variação da ordem de 3%. Uma possível explicação para o comportamento observado na ETa estimada pelo modelo de Ritchie foi alta frequência de irrigação, que manteve a Es durante todo o experimento na fase 1 de evaporação da água do solo nos dois experimentos. Isto é, o total evaporado não ultrapassou o valor do parâmetro U, igual a 13 mm. O valor obtido para o parâmetro α , que representa a evaporação na fase 2, foi igual a 4,83 mm d^{-0,5}.

Ainda na Tabela 3, analisando os modelos dentro de cada tratamento no experimento de inverno, observou-se que no tratamento T1 os modelos ET_{ADUAL}, ET_{AJEN}, ET_{ACRP} e ET_{ARIT} subestimaram a ETa da ordem de 4, 23, 15 e 4 %, respectivamente, em relação ao valor observado. No tratamento T2, a ETa estimada pelos modelos ET_{AJEN} e ET_{ACRP} subestimaram em aproximadamente 17% o valor observado, já o modelo ET_{ARIT} subestimou em 2 %. O modelo ET_{ADUAL} apresentou valor igual ao observado. Para o tratamento T3 os modelos ET_{ADUAL} e ET_{ARIT} superestimaram o valor observado em 12 %, enquanto os modelos ET_{AJEN} e ET_{ACRP} subestimaram em 5 e 6 %, respectivamente. No tratamento T4, a superestimativa do valor observado foi de 3 e 11% pelos modelos ET_{ADUAL} e ET_{ARIT}, ao tempo que os modelos ET_{AJEN} e ET_{ACRP} subestimaram em 10 e 9 %, respectivamente. Por fim, no tratamento T5, os modelos ET_{ADUAL} e ET_{ARIT} superestimaram a ETa da ordem de 7 e 20 %, enquanto ET_{AJEN} e ET_{ACRP} subestimaram em 4 e 9 %, respectivamente.

No experimento de verão, ainda analisando os modelos dentro de cada tratamento, a ETa calculada pelos modelos ET_{AJEN} e ET_{ARIT}, para o tratamento T1, foi subestimada em 10% e 2%, enquanto os modelos ET_{ADUAL} e ET_{ACRP} superestimaram em 9 e 5% os valores da ET_{AGRA}, respectivamente. No tratamento T2, enquanto o

modelo ET_{ARIT} apresentou valor igual a ET_{AGRA}, e ET_{AJEN} subestimou a ET_{AGRA} em 6%, os modelos ET_{ADUAL} e ET_{ACRP} superestimaram em 12 e 3%, respectivamente. Os modelos ET_{ADUAL}, ET_{AJEN}, ET_{ACRP} e ET_{ARIT} superestimaram a ET_{AGRA} em 17, 2, 5 e 10%, para o tratamento T3, em 24, 8, 11 e 19%, para T4, e em 28, 13, 14 e 24%, para T5, respectivamente (Tabela 3).

A diferença observada na estimativa da ETa pelos modelos pode ser atribuída às diferentes concepções dos modelos, tanto nas condições sem restrição hídrica como nas diferentes faixas de estresse de água no solo. Apesar de alguns modelos utilizarem a mesma variável dentro de suas rotinas para cálculo da ETa, como o uso da ET_o pelos modelos ET_{ADUAL}, ET_{AJEN} e ET_{ACRP}, e que o modelo ET_{ARIT} utiliza a ET_{MAX}, ambas para contabilizar a demanda evapotranspirativa, outras variáveis apresentam diferentes abordagens, como a utilização do IAF pelo modelo ET_{ARIT}, o percentual de cobertura pelo modelo ET_{ACRP}, e os coeficientes K_{cb}, K_s e K_e pelos ET_{ADUAL} e ET_{AJEN}.

O modelo ET_{AJEN} subestimou os valores observados da ETa para todos os tratamentos do experimento de inverno e para os tratamentos T1 e T2, no experimento de verão (Tabela 3). Supõe-se que a subestimativa foi decorrente da forma com que o modelo calcula o coeficiente K_e, assumindo valores de $(0,9 - K_{cb})$ 0,8; $(0,9 - K_{cb})$ 0,5; $(0,9 - K_{cb})$ 0,3, após o primeiro, segundo e terceiro dias após uma chuva ou irrigação, respectivamente. Com essa abordagem, os valores de K_e podem variar, já no primeiro dia após uma chuva ou irrigação, entre 0 (K_{cb} = 0,9) e 0,72 (K_{cb} = 0). Nessas mesmas condições, utilizando-se a equação de K_e proposta por Allen *et al.* (1998), para K_{cb} igual a zero o valor de K_e passou a ser 1,10, 53% maior que o valor máximo de K_e para o modelo de Jensen *et al.* (1971). Para os máximos valores de K_{cb}, 0,9 para o modelo de Jensen, e 1,10 para o modelo Dual FAO 56, os valores de K_e passaram a ser 0. Entretanto, para o modelo Dual FAO 56, valores de K_{cb} = 0,9, nas condições deste estudo, resultaram em valores de K_e $\cong$ 0,27. Sabendo que menores valores de K_e implicam em menores valores da ETa, foi observado na fase inicial dos dois experimentos que os valores de K_e, determinados por Jensen, foram menores em média 64% para T1 e 40% para T5 que o K_e calculado pelo modelo Dual FAO 56.

No caso da ET_{ACRP} observou-se uma alta sensibilidade do modelo às variações de CC, que, para melhor representar a realidade, foi convertido na cobertura atual do dossel ajustada para os efeitos da microadvecção (CC*), por meio de uma função polinomial de terceira ordem.

A baixa sensibilidade do modelo de Ritchie ao aumento do déficit de umidade no solo pode ser explicada pela alta frequência de irrigação, que manteve a superfície do solo sempre úmida, ou seja, o modelo se manteve, até cobertura completa do solo, sempre na fase 1 de evaporação, isto é, com elevadas taxas de E_s

Evapotranspiração atual diária

A ET_a , no tratamento T1 do experimento de inverno, calculada pelos modelos ET_{aDUAL} , ET_{aJEN} , ET_{aACRP} e ET_{aRIT} apresentou valores diários variando de 2,9 mm d⁻¹ (valor mínimo) a 5,8 mm d⁻¹ (valor máximo), 2,0 a 5,4 mm d⁻¹, 2,4 a 5,0 mm d⁻¹ e 2,6 a 5,6 mm d⁻¹, respectivamente. Para o experimento de verão, seguindo a mesma ordem, a variação foi de 2,2 a 8,2 mm d⁻¹; 1,7 a 7,9 mm d⁻¹; 2,2 a 8,2 mm d⁻¹ e 1,6 a 7,3 mm d⁻¹. A ET_{aGRA} variou entre 2,2 a 8,3 mm d⁻¹.

Na Figura 3 está apresentada a relação entre a evapotranspiração atual estimada pelos modelos FAO56, Jensen e Heermann, AquaCrop e Ritchie e a ET_a observada.

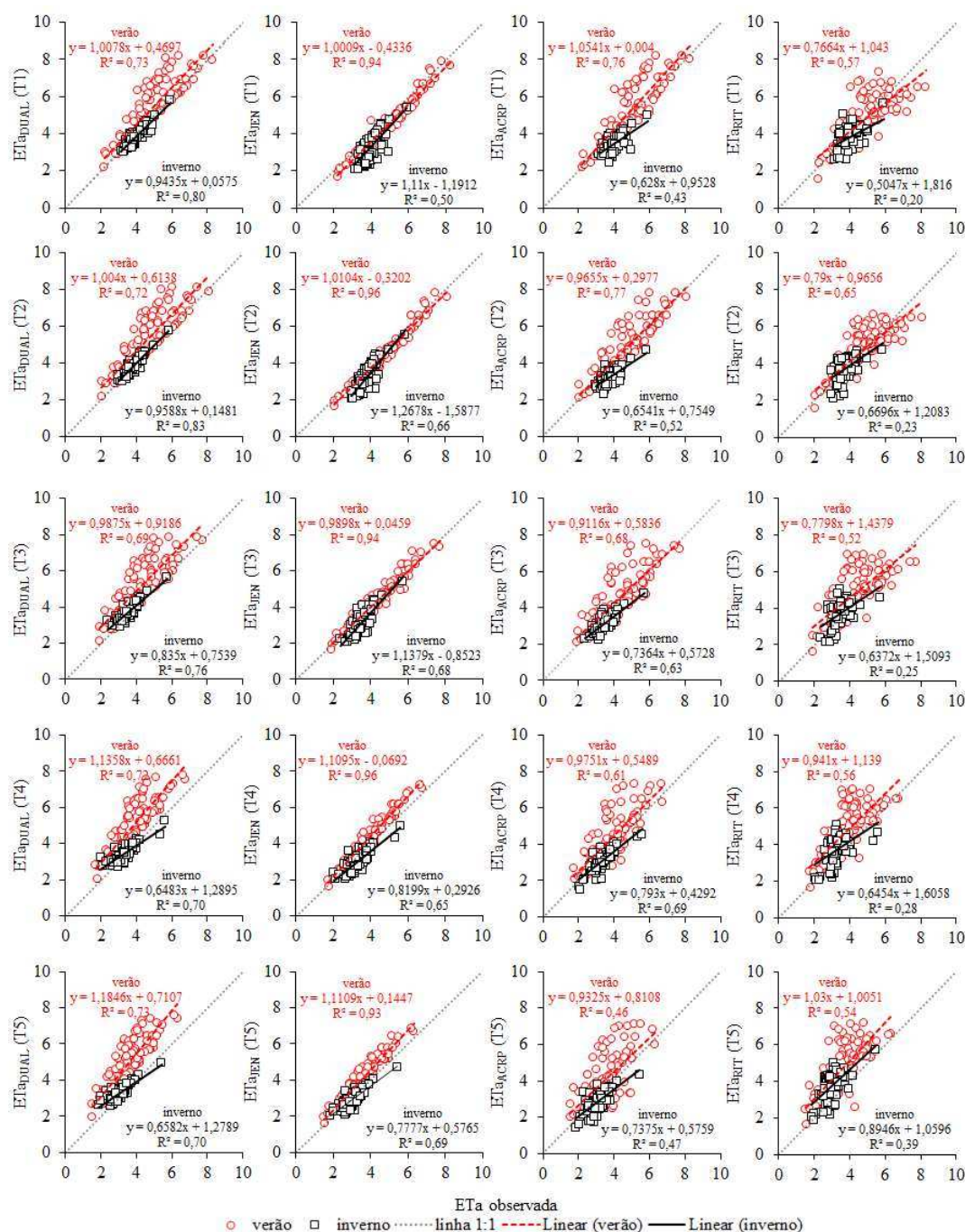


Figura 3. Comparação entre valores de evapotranspiração atual da cultura da soja observados (ET_{aGRA}) e estimados pelos FAO56 Dual (ET_{aDUAL}), Jensen e Heermann (ET_{aJEN}), AquaCrop (ET_{aACRP}) e Ritchie (ET_{aRIT}) para os tratamentos [T1: déficit hídrico 0 a 20% da água disponível no solo (AD); T2: 20-40% AD; T3: 40-60% AD; T4: 60-80% AD e T5: 80-100% AD)] nos experimentos de inverno e verão.

Com base nos valores de r^2 , que variaram de 70 a 83%, observa-se que, no experimento de inverno, em todos os tratamentos a ET_a foi melhor estimada pelo modelo ET_{aDUAL} . Na sequência, com valores de r^2 variando entre 50 e 69%, vem o

modelo ET_{AJEN}, seguido do modelo ET_{ACRP} com r^2 variando de 43 a 69%. Dentre os modelos avaliados, o modelo ET_{ARIT} foi o que apresentou o pior desempenho para todos os tratamentos, com r^2 variando de 20 a 39% (Figura 3).

No verão, o modelo ET_{AJEN} foi o que melhor estimou a ETa, com valores de r^2 variando entre 93 e 96%. Na sequência, tem-se o modelo ET_{DUAL} seguido pelo modelo ET_{ACRP}, com r^2 variando de 46 a 77%. Apesar de ter apresentado maiores valores de r^2 que no estudo de inverno, o modelo ET_{ARIT} continuou apresentado o pior desempenho na determinação da ETa no verão.

Analizando a linha de tendência dos modelos em relação a linha 1:1 (Figura 3) e os valores de MBE apresentados na Tabela 4, para os experimentos de inverno e verão foi possível determinar quais modelos subestimaram e superestimaram a ET_{GRA}. No experimento de inverno, observou-se, no tratamento T1, que os modelos ET_{DUAL} (MBE = -0,17), ET_{AJEN} (MBE = -0,75), ET_{ACRP} (MBE = -0,54) e ET_{ARIT} (MBE = -0,16) subestimaram os valores de ET_{GRA}. No tratamento T2, a subestimativa dos valores da ET_{GRA} foi observada apenas nos modelos ET_{AJEN}, ET_{ACRP} e ET_{ARIT}. O modelo ET_{DUAL} não diferiu do valor observado. No tratamento T3, os modelos ET_{DUAL} e ET_{ARIT} superestimaram os valores da ET_{GRA}, enquanto ET_{AJEN} e ET_{ACRP} apresentaram subestimativa. Os tratamentos T4 e T5 apresentaram comportamento similar a T3 para os modelos que sub e superestimaram a ET_{GRA}.

Para o experimento de verão, a ETa foi subestimada pelos modelos ET_{AJEN}, nos tratamentos T1 e T2, e ET_{ARIT}, no tratamento T1. O modelo ET_{ARIT}, no tratamento T2, e o modelo ET_{AJEN}, no tratamento T3, foram iguais ao valor da ET_{GRA}. Nos demais tratamentos, a ETa foi superestimada pelos os modelos.

Na Tabela 4 apresenta-se os indicadores de desempenho dos modelos para todos os tratamentos, nas duas épocas de cultivo da soja. Os desempenhos dos modelos ET_{DUAL}, nos tratamentos T3 (NSE = 0,60) e T4 (NSE = 0,42), modelo ET_{AJEN}, em T3 (NSE = 0,38) e T5 (NSE = 0,59), como também ET_{ACRP}, no tratamento T4 (NSE = 0,39), apresentaram desempenho aceitável, segundo classificação proposta por Collischonn (2001).

No experimento de verão, de maneira geral, considerando como critério o NSE, NSE > 0,36, os modelos apresentaram desempenho aceitável, com exceção da ET_{DUAL} e ET_{ARIT} em T3, T4 e T5, e ET_{ACRP} no tratamento T5.

Tabela 4. Indicadores de desempenho dos modelos FAO56 Dual (ET_{aDUAL}), Jensen e Heermann (ET_{aJEN}), AquaCrop (ET_{aACRP}) e Ritchie (ET_{aRIT}) na estimativa da evapotranspiração atual da cultura da soja, considerando os tratamentos [T1: déficit hídrico 0 a 20% da água disponível no solo (AD); T2: 20-40% AD; T3: 40-60% AD; T4: 60-80% AD e T5: 80-100% AD)]

Tratamento	Modelo	inverno			verão		
		NSE	RMSE	MBE	NSE	RMSE	MBE
T1	ET_{aDUAL}	0,67	0,27	-0,17	0,62	0,93	0,51
	ET_{aJEN}	-0,61	0,91	-0,75	0,84	0,53	-0,43
	ET_{aACRP}	-1,25	0,65	-0,54	0,73	0,80	0,27
	ET_{aRIT}	-0,10	0,54	-0,16	0,51	0,91	-0,09
T2	ET_{aDUAL}	0,83	0,20	0,00	0,54	1,01	0,63
	ET_{aJEN}	-0,03	0,71	-0,57	0,92	0,37	-0,27
	ET_{aACRP}	-1,50	0,65	-0,56	0,76	0,68	0,14
	ET_{aRIT}	0,20	0,51	-0,05	0,61	0,77	0,00
T3	ET_{aDUAL}	0,60	0,29	0,17	0,33	1,19	0,87
	ET_{aJEN}	0,38	0,53	-0,36	0,94	0,31	0,00
	ET_{aACRP}	-0,10	0,47	-0,36	0,65	0,80	0,20
	ET_{aRIT}	0,04	0,60	0,22	0,34	1,06	0,49
T4	ET_{aDUAL}	0,42	0,33	0,11	0,01	1,41	1,19
	ET_{aJEN}	0,32	0,46	-0,31	0,87	0,44	0,35
	ET_{aACRP}	0,39	0,41	-0,26	0,49	0,95	0,45
	ET_{aRIT}	-0,19	0,74	0,42	0,09	1,27	0,91
T5	ET_{aDUAL}	0,16	0,38	0,24	-0,28	1,54	1,36
	ET_{aJEN}	0,59	0,31	-0,10	0,70	0,62	0,54
	ET_{aACRP}	0,26	0,48	-0,22	0,28	1,15	0,57
	ET_{aRIT}	-0,60	0,95	0,74	-0,11	1,45	1,11

Analisando a Tabela 4, no experimento de inverno, observou-se que dentre os modelos, a ET_{aDUAL} foi o que apresentou menor erro na estimativa dos valores da ET_{aGRA} , para os tratamentos T1 (RMSE = 0,27 mm d⁻¹), T2 (RMSE = 0,20 mm d⁻¹), T3 (RMSE = 0,29 mm d⁻¹) e T4 (RMSE = 0,33 mm d⁻¹), já para o tratamento T5 (0,31 mm d⁻¹), o modelo ET_{aJEN} apresentou melhor desempenho que os demais. No experimento de verão, o modelo ET_{aJEN} apresentou menores valores de RMSE para todos os tratamentos, variando de 0,31 mm d⁻¹ (T3) a 0,62 mm d⁻¹ (T5). Para o

experimento de inverno, os maiores valores de RMSE foram observados nos modelos ET_{aJEN}, para os tratamentos T1 (RMSE = 0,91 mm d⁻¹) e T2 (RMSE = 0,71 mm d⁻¹), e ET_{aRIT}, para os tratamentos T3 (RMSE = 0,60 mm d⁻¹), T4 (RMSE = 0,74 mm d⁻¹) e T5 (RMSE = 0,95 mm d⁻¹). Já no experimento de verão, o modelo ET_{aDUAL} apresentou o pior desempenho em todos os tratamentos, com valores de RMSE variando entre 0,93 mm d⁻¹, no tratamento T1, e 1,54 mm d⁻¹, para o tratamento T5.

Dhiambo e Irmak (2012), ao avaliarem para o Estado de Nebraska, EUA, a ET_a estimada pelos métodos da razão de Bowen e ET_{aDUAL}, para a cultura da soja, encontraram r^2 de 0,64 e 0,75 para os anos de 2007 e 2008, respectivamente. Ambos os estudos foram desenvolvidos em condição similares aos tratamentos T1 e T2 deste trabalho.

O modelo ET_{aDUAL} avaliado em diferentes regiões do mundo, embora para culturas diferentes da soja, apresentou resultados satisfatórios. Er-Raki *et al.* (2010) obtiveram valores de RMSE iguais a 0,54 e a 0,71 mm d⁻¹ e MBE de 0,02 e 0,05 mm d⁻¹, para os anos de 2003 e 2004, respectivamente, quando avaliaram a estimativa da ET_a pelo modelo ET_{aDUAL} em relação a ET_a estimada pela Covariância de Eddy para a cultura da oliveira cultivada no Marrocos. Paredes *et al.* (2018), estudando o modelo ET_{aDUAL} para a cultura da batata nas condições do Sul da Itália, encontraram r^2 de 0,93 e RMSE igual a 0,87 mm d⁻¹.

2.2.4 Conclusões

No experimento de inverno, o modelo FAO56 Dual foi o que apresentou o melhor desempenho na estimativa da evapotranspiração atual da cultura da soja para maioria dos tratamentos. Na sequência, o modelo de Jensen e Heermann seguido pelo modelo AquaCrop apresentaram os melhores desempenhos.

No experimento de verão, o modelo de Jensen e Heermann foi o que apresentou o melhor desempenho na estimativa da evapotranspiração atual, seguido dos modelos AquaCrop e FAO56 Dual.

De maneira geral, analisando os dois experimentos, o modelo de Jensen e Heermann foi o que melhor representou a evapotranspiração atual da cultura da soja na região do Cerrado, seguido pelo modelo FAO56 Dual. Na sequência, desataca-se o modelo AquaCrop e o modelo de Ritchie só apresentou bom desempenho no experimento de verão.

Dentre os modelos avaliados, o modelo de Ritchie foi o que apresentou, de maneira geral, o pior desempenho na estimativa da evapotranspiração atual.

2.2.5 Agradecimentos

Este estudo teve apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Distrito Federal (projeto Termo de Outorga 541/2016 FAPDF), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA Cerrados - projeto 20.18.01.015.00.06.006), Universidade Federal de Viçosa (UFV) e em parte, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - código financeiro 001, e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Bolsa número 870171 / 1997-6.

2.2.6 Referências

AGROSATÉLITE, ABIOVE. **Análise geoespacial da dinâmica da soja no bioma Cerrado: 2014 a 2017**. Florianópolis, SC, 2018.

ALLEN, R. G. *et al.* **Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements**. **FAO Irrigation and drainage paper 56**. Roma, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

ALLEN, R. G. *et al.* **Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos [Crop evapotranspiration: Guidelines for determination of water requirements of crops]**. Rome: Food and Agriculture Organization. Rome. [s.l.] FAO Rome, Italy, 2006.

ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N. The expansion of center-pivot irrigation in the Cerrado Biome. **IRRIGA**, v. 1, n. 1, p. 56–61, 30 out. 2019.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.

ALVES, É. D. SILVA *et al.* Modelo de simulação para avaliar o impacto das condições do clima e da planta na lâmina irrigada. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 13, n. 6, p. 3741-3748–3748, 14 maio 2020.

BELLO, Z. A.; WALKER, S. Evaluating AquaCrop model for simulating production of amaranthus (*Amaranthus cruentus*) a leafy vegetable, under irrigation and rainfed conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 247, p. 300–310, 15 dez. 2017.

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

CHIBARABADA, T. P.; MODI, A. T.; MABHAUDHI, T. Calibration and evaluation of Aquacrop for groundnut (*Arachis hypogaea*) under water deficit conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 281, p. 107850, 15 fev. 2020.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica em grandes bacias**. Porto Alegre: UFRGS, 2001. 194p. Tese Doutorado.

CONTRERAS, J. I. *et al.* Irrigation management of greenhouse zucchini with different soil matric potential level. Agronomic and environmental effects. **Agricultural Water Management**, Special Issue: Advances on ICTs for Water Management in Agriculture. v. 183, p. 26–34, 31 mar. 2017.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24**. Roma, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1977.

ER-RAKI, S. *et al.* Using the dual approach of FAO-56 for partitioning ET into soil and plant components for olive orchards in a semi-arid region. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 11, p. 1769–1778, 1 nov. 2010.

GONÇALVES, L. J. *et al.* USO DO IRRIGÂMETRO NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA EM AMBIENTE PROTEGIDO. **Revista Caatinga**, v. 32, n. 3, p. 778–785, 27 ago. 2019.

HSIAO, T. C. *et al.* AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 448–459, 2009.

JENSEN, M. E.; HEERMANN, D. F. Meteorological approaches to irrigation scheduling. 1970.

JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; PRATT, B. J. Estimating Soil Moisture Depletion from Climate, Crop and Soil Data. **Transaction of the ASAE**, v. 14, n. 5, p. 954–959, 1971.

JIANG, X. *et al.* Modeling evapotranspiration and its components of maize for seed production in an arid region of northwest China using a dual crop coefficient and multisource models. **Agricultural Water Management**, v. 222, p. 105–117, 1 ago. 2019.

JONES, J.; RITCHIE, J. Crop growth models. **Management of farm irrigation systems**, p. 63–89, 1990.

LEAMER, R. W.; SHAW, B. A Simple Apparatus for Measuring Noncapillary Porosity on an Extensive Scale 1. **Agronomy Journal**, v. 33, n. 11, p. 1003–1008, 1 nov. 1941.

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.

MBANGIWA, N. C.; SAVAGE, M. J.; MABHAUDHI, T. Modelling and measurement of water productivity and total evaporation in a dryland soybean crop. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 266–267, p. 65–72, 15 mar. 2019.

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

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, 1 fev. 2012.

OLIVEIRA, L. B. DE. Determinação da macro e microporosidade pela “mesa de tensão” em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 3, n. 1, p. 197–200, 1968.

PAREDES, P. *et al.* Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybeans in North China Plain. **Agricultural Water Management**, v. 152, p. 57–71, 2015.

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

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, A. R. *et al.* Evapotranspiração. 2013.

PEREIRA, L. S. *et al.* Modeling malt barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years. Assessing AquaCrop and SIMDualK_c models. **Agricultural Water Management**, v. 159, p. 239–254, 1 set. 2015.

PHILIP, J. R. Evaporation, and moisture and heat fields in the soil. **Journal of meteorology**, v. 14, n. 4, p. 354–366, 1957.

QI, W. *et al.* Crack closure and flow regimes in cracked clay loam subjected to different irrigation methods. **Geoderma**, v. 358, p. 113978, 15 jan. 2020.

RAES, D. *et al.* 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.

RICHARDS, L. A. Pressure membrane apparatus - Construction and use. **Agronomy Engineering**, v. 28, p. 451–454, 1947.

RICHTER, K. *et al.* **Goodness-of-fit measures: what do they tell about vegetation variable retrieval performance from Earth observation data.** Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIII. **Anais...** In: REMOTE SENSING FOR AGRICULTURE, ECOSYSTEMS, AND HYDROLOGY XIII. International Society for Optics and Photonics, 7 out. 2011 Disponível em: <<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/8174/81740R/Goodness-of-fit-measures--what-do-they-tell-about/10.1117/12.897980.short>>. Acesso em: 27 jun. 2020

RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, v. 8, n. 5, p. 1204–1213, out. 1972.

RITCHIE, J. T.; JOHNSON, B. S. Soil and plant factors affecting evaporation. **Agronomy**, 1990.

RODRIGUES, L. N. *et al.* O MODELO DE RITCHIE NA DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DO FEIJOEIRO (PHASEOLUS VULGARIS L.) IRRIGADO. **Ceres**, v. 44, n. 252, 1997a.

RODRIGUES, L. N. *et al.* O modelo de Ritchie na determinação da evapotranspiração do feijoeiro (Phaseolus vulgaris L.) irrigado. **Ceres**, v. 44, n. 252, 1997b.

RODRIGUES, L. N. *et al.* Modelo de Ritchie: descrição e aplicação. **Embrapa Cerrados. Documentos**, 2005.

SCHAEFLI, B.; GUPTA, H. V. Do Nash values have value? **Hydrological Processes**, v. 21, n. 15, p. 2075–2080, 2007.

SOUSA, D. DE; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. **Planaltina: Embrapa Cerrados**, v. 416, 2004.

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

TAN, S. *et al.* Performance of AquaCrop model for cotton growth simulation under film-mulched drip irrigation in southern Xinjiang, China. **Agricultural Water Management**, v. 196, p. 99–113, 31 jan. 2018.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. [s.l.] Brasília, DF: Embrapa, 2017., 2017.

TORRES, I. *et al.* Irrigation decision support based on leaf relative water content determination in olive grove using near infrared spectroscopy. **Biosystems Engineering**, v. 180, p. 50–58, 1 abr. 2019.

WILLMOTT, C.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate Research**, v. 30, p. 79–82, 2005.

ZHENG, W. *et al.* Developing water and nitrogen budgets of a wheat-maize rotation system using auto-weighing lysimeters: Effects of blended application of controlled-release and un-coated urea. **Environmental Pollution**, p. 114383, 17 mar. 2020.

2.3 Artigo 3 – Evaporação direta da água do solo em função do secamento e da porcentagem de cobertura do solo

Resumo: As perdas por evaporação direta de água do solo, em um sistema produtivo, são significativas e constituem-se em uma retirada não benéfica de água do sistema, uma vez que não contribui para a produção, devendo, sempre que possível, ser reduzida e melhor quantificada. Uma das formas de quantificar a evaporação da água no solo é através do uso de microlisímetros de pesagem de materiais alternativos, como o PVC (policloreto de vinila), que além de ser de baixo custo, podem ser de diversos diâmetros e altura. Assim, objetivou-se com o presente trabalho estimar a evaporação direta da água do solo em função da cobertura. O estudo foi realizado na Unidade de Referência em Manejo de Água (URMA) do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (Embrapa Cerrados), no ano de 2019. Foram realizados três experimentos em três períodos diferentes, sendo o experimento 1 (E1) realizado de 23/05 a 16/06, o experimento 2 (E2) realizado de 18/07 a 11/08 e o experimento 3 (E3) teve sua realização de 21/08 a 14/09. Em cada um dos períodos, de forma paralela e em uma área ao lado, foi realizado um experimento com o objetivo de avaliar a influência da altura do ML na estimativa da evaporação direta do solo. Os experimentos foram instalados com delineamento inteiramente casualizado. Para os experimentos que mediram a evaporação em função da cobertura, os tratamentos foram constituídos de seis diferentes percentuais de cobertura da área interna do ML (0, 10, 25, 50, 75 e 100%), com quatro repetições, sendo a cobertura realizada por plantas artificiais. Os tratamentos foram: tratamento 1 (T1) = 0% de cobertura; T2 = 10% de cobertura; T3 = 25% de cobertura; T4 = 50% de cobertura; T5 = 75% de cobertura; e T6 = 100% de cobertura. Já os experimentos que estimaram a evaporação em função da altura dos ML foram realizados com oito repetições e três diferentes alturas dos ML (100, 200 e 300 mm). Os tratamentos foram constituídos de três diferentes alturas dos ML, sendo: Ta1 = 300 mm, Ta2 = 200 mm e Ta3 = 100 mm de altura. De acordo com os resultados apresentados, foi possível observar que a evaporação acumulada até os 25 dias após a irrigação foi menor nos microlisímetros com 100 mm de altura, quando comparado aos microlisímetros com 200 e 300 mm, para todos os experimentos, da ordem de 52% e 53%, respectivamente. O novo modelo desenvolvido para calcular a evaporação do solo em função dos dias após a irrigação e do percentual de cobertura do solo apresentou ótimo desempenho, com NSE = 0,92, e baixo erro da estimativa (RMSE médio de 0,11 mm d⁻¹).

Palavras-chave: modelagem, evapotranspiração, manejo da irrigação, hidrologia.

2.3.1 Introdução

O Cerrado é o segundo maior bioma em extensão e a principal fronteira agrícola do Brasil. A região, com precipitação total anual média de 1.500 mm, tem na cultura de sequeiro a base de sua produção. Em 2017 respondia por quase 45% de toda a produção de cereais, leguminosas e oleaginosas produzidas no país (IBGE, 2018).

A produção agrícola na região pode ser aumentada significativamente com a irrigação, que apresenta tendência de crescimento média de 56.000 hectares ano⁻¹ (ALTHOFF; RODRIGUES, 2019). O aumento na área irrigada demandará mais recursos hídricos, podendo aumentar as disputas pelo uso de água, principalmente nas bacias hidrográficas onde a irrigação cresceu sem planejamento.

O Brasil se destaca como produtor e exportador de várias commodities agrícolas, com destaque para a cultura da soja. Com uma exportação estimada em 74 milhões de toneladas, que gerou uma receita de US\$ 26 bilhões de dólares no ano de 2019, o Brasil se apresenta como o maior exportador de soja do mundo (MAPA, 2020). A maior parte dessa produção vem de áreas de sequeiro (SILVA *et al.*, 2019).

Na safra 2018/19, mais da metade (51%) da área cultivada com soja no Brasil (35,7 Mha) estava concentrada no bioma Cerrado (AGROSATÉLITE, 2020), segundo maior bioma do país em extensão. Segundo os autores, espera-se que até a safra 2028/29 a área cultivada com soja no bioma aumente em até 5,0 Mha, em substituição a pastagens. A soja nessa região 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.

Nessa região, que apresenta, de maneira geral, carência de dados de solo, clima e água que possam subsidiar estratégias de desenvolvimento, é importante gerar informações que contribuam para a sustentabilidade da agricultura irrigada. A perda por evaporação direta de água do solo (Es) é um dos componentes do balanço hídrico mais significativo (RAZ-YASEEF; ROTENBERG; YAKIR, 2010), no entanto, é muito pouco estudada. Em um sistema produtivo, as perdas por Es são significativas. Klocke *et al.* (1985) observaram que a Es representou cerca de 30% da evapotranspiração de uma cultura de milho. Rodrigues *et al.* (1997) estudando a cultura do feijão em solos argilosos, observaram que, até atingir a cobertura total do solo, a Es representou 49,3 e 53,9% da evapotranspiração da cultura, para as irrigações com frequências de 5 e 10 dias, respectivamente.

A Es constitui em uma retirada não benéfica de água do sistema, uma vez que não contribui para a produção, devendo, sempre que possível, ser reduzida e melhor quantificada (RODRIGUES; PRUSKI, 2019). A Es consiste na retirada de água do solo para a atmosfera na

forma de vapor (Rodrigues, 2017), tendo sua ocorrência predominantemente nas camadas superficiais do solo. Embora a Es seja um processo físico influenciado pelas características e manejo do solo e por diversas interações ambientais, a disponibilidade de energia e água são fatores que regulam esse processo de forma predominante. Klocke *et al.* (1990) afirmaram que a frequência de umedecimento e o percentual de cobertura, como também as propriedades físicas do solo, são as características que mais influenciam na Es.

A Es é um processo dinâmico que pode ser estimada por meio de modelagem matemática (BLACK; GARDNER; THURTELL, 1969; JENSEN; WRIGHT; PRATT, 1971; ALLEN *et al.*, 1998, 2006), balanço de energia (HILLEL, 1980) e pelo balanço de água no solo (HANKS; ASHCROFT, 1980), com destaque para os lisímetros de pesagem (QUINN; PARKER; RUSHTON, 2018; FARIA JUNIOR *et al.*, 2019). Apesar da sua precisão, os lisímetros de pesagem apresentam custos elevados de construção e instalação (SCHNEIDER *et al.*, 1998), o que dificulta a sua aplicação.

Os microlisímetros (ML), embora menos precisos devido à sua pequena superfície evaporante, tem se apresentado como uma boa alternativa aos lisímetros de pesagem e drenagem, tendo sido utilizados em diversos trabalhos de estimativa da Es (DALMAGO *et al.*, 2010; FLUMIGNAN; FARIA; LENA, 2012; UCLÉS *et al.*, 2013; FARIA JUNIOR *et al.*, 2019; BARIVIERA *et al.*, 2020; FEIGENWINTER *et al.*, 2020). A alteração na área da superfície evaporante do solo causada pela variação no tamanho do diâmetro do ML, que normalmente varia de 50 a 300 mm, não influenciou significativamente na taxa de Es (DAAMEN *et al.*, 1993; NINARI; BERLINER, 2002). Já para a altura dos ML (100 e 200 mm), foram observadas diferenças significativas para os valores da Es a partir de dois dias após a irrigação (DAAMEN *et al.*, 1993). Segundo Agam (2014), a discussão sobre a profundidade ideal dos ML ainda precisa ser melhor estudada.

No manejo da irrigação, diversos modelos, com diferentes abordagens, possibilitam estimar a evapotranspiração da cultura (ET), separando a Es da transpiração (T) (ALLEN *et al.*, 1998; KROES *et al.*, 2008; RITCHIE, 1972; RAES *et al.*, 2009; HSIAO *et al.*, 2009; STEDUTO *et al.*, 2009). Essas diferentes abordagens geralmente consideram, no cálculo do Es a influência da cobertura do solo, que pode ser calculada por meio do índice de área foliar (IAF) ou da percentagem de solo coberto (CC). Em estudo realizado comparando a Es em ambientes sombreados e não sombreados, Raz-Yaseef *et al.* (2010) observaram que os valores de Es, foram, em média, o dobro nas áreas descobertas, quando comparados as áreas sombreadas.

Além da porcentagem de cobertura do solo, a taxa de evaporação varia em função da umidade do solo. Esse processo é normalmente dividido em três fases (LEMON, 1956; PHILIP, 1957; IDSO *et al.*, 1974). Na primeira fase, a taxa de evaporação é governada pela demanda

atmosférica. Na fase 2, quando a disponibilidade de água diminui e a superfície do solo apresenta-se mais seca, a taxa de evaporação passa a depender em maior magnitude do processo de difusão de vapor de água, que depende, entre outras coisas, da porosidade e da tortuosidade do meio poroso. Nesta fase, a Es é mantida pelos fluxos ascendentes de água do solo. A Es diminui com o decréscimo de umidade do solo. Existe uma proporção entre a quantidade de água restante na camada do solo e o total prontamente disponível para Es nesta fase 2 (SOARES *et al.* (2001). A dinâmica de secamento na fase 3 é semelhante à fase 2, mas é de menor importância para irrigação em virtude da frequência de umedecimento do solo.

Para regiões como o Cerrado brasileiro onde o correto manejo de irrigação é fundamental para a sustentabilidade dos sistemas de produção, torna-se fundamental melhorar as estimativas da Es visando o estabelecimento de estratégias de conservação de água. Entender a dinâmica dessa variável frente ao secamento e a cobertura do solo é fundamental para aprimorar os modelos de simulação. Assim, objetivou-se com o presente trabalho estimar a evaporação direta da água do solo em função do secamento e da porcentagem de cobertura do solo.

2.3.2 Material e métodos

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). Com elevação de 979 m, a URMA está localizada na região do Planalto Central do Bioma Cerrado (15°35'55.1"S, 47°42' 19"O).

O clima da região é classificado como As (Alvares *et al.* 2013), 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; DA SILVA; EVANGELISTA, 2010).

O solo da área é classificado como Latossolo vermelho, com 37% de areia, 51% de argila e 12% de silte na camada de 0 a 20 cm, e 32% de areia, 52% de argila e 16% de silte na camada de 20 a 40 cm, respectivamente.

Delineamento experimental

Foram realizados três experimentos, em três períodos diferentes, com o objetivo de avaliar a influência do secamento e da cobertura do solo na Es (ESC). O experimento 1 (E1) foi realizado de 23/05 a 16/06, o experimento 2 (E2) realizado de 18/07 a 11/08 e o experimento 3 (E3) teve sua realização de 21/08 a 14/09 (Figura 1A). Paralelamente a esses experimentos, foi

realizado um experimento com o objetivo de avaliar a influência da altura do ML na estimativa da evaporação direta do solo (EAML), Figura 1B.

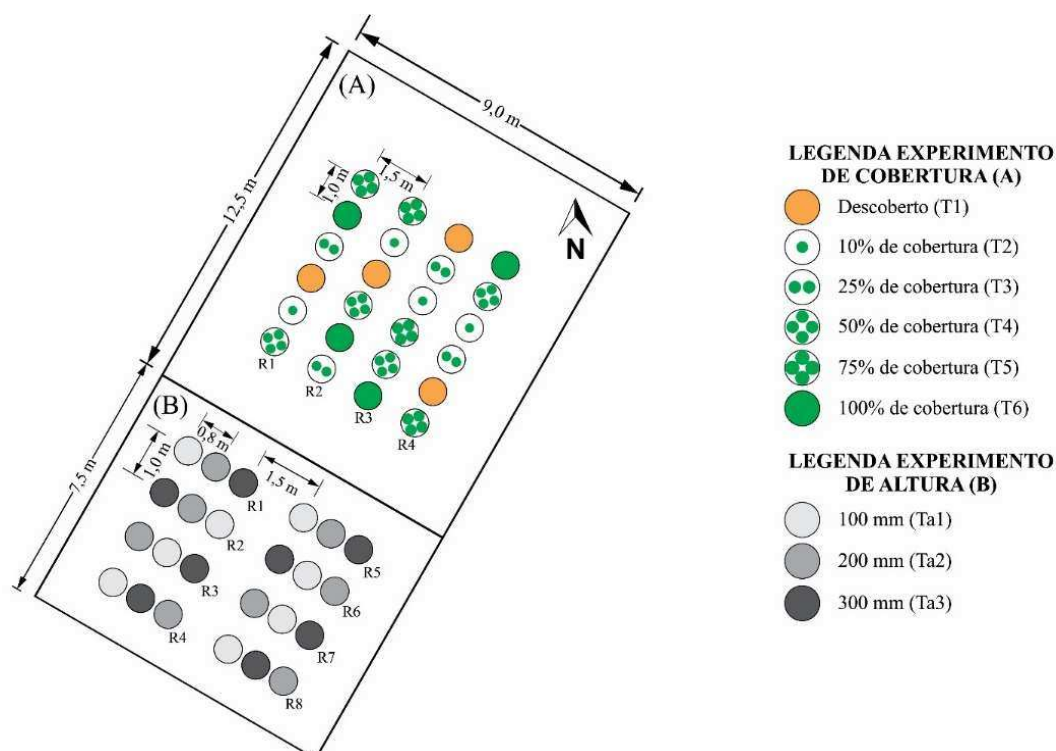


Figura 1. Croqui da área experimental, destacando os experimentos de secamento e cobertura do solo (A) e de altura do microlisímetro (B). T1, T2, T3, T4, T5 e T6 indicam os tratamentos de secamento e cobertura do solo e Ta1, Ta2 e Ta3 indicam os tratamentos de altura.

Os experimentos foram instalados na área da URMA, com delineamento inteiramente casualizado.

Para o ESC, os tratamentos foram constituídos de seis diferentes percentuais de cobertura da área interna do ML (T1 = 0, T2 = 10, T3 = 25, T4 = 50, T5 = 75 e T6 = 100%), com quatro repetições em cada um dos seis tratamentos, vinte e quatro parcelas experimentais. Os tratamentos foram: tratamento 1 (T1) = 0% de cobertura (descoberto); T2 = 10% de cobertura; T3 = 25% de cobertura; T4 = 50% de cobertura; T5 = 75% de cobertura; e T6 = 100% de cobertura.

No EAML, os tratamentos foram constituídos de ML com três diferentes alturas (Ta1 = 300 mm, Ta2 = 200 mm e Ta3 = 100 mm), com oito repetições, totalizando vinte e quatro parcelas.

Microlisímetros de pesagem

A evaporação direta da água do solo foi avaliada por meio de ML de pesagem. Na construção dos ML foi utilizado tubo de PVC de 150 mm de diâmetro, com altura de 30 cm. Com o objetivo de evitar a perda de solo foi colocado na parte de baixo do ML uma camada de 1 cm de brita zero e uma tela de 2 mm de malha que foi fixada a parede do ML por uma fita de alta aderência.

Para evitar o desbarrancamento do solo durante a instalação e manejo do ML, foi instalada uma proteção às paredes do local onde o ML foi instalado. A proteção foi confeccionada utilizando-se material de PETG (Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol) com 0,75 mm de espessura.

Com o objetivo de elevar a umidade do solo da área experimental e dos MLs à capacidade de campo, foi aplicada uma lâmina de irrigação de 15 mm na área. A lâmina foi aplicada por meio de um sistema de irrigação por aspersão convencional de baixo impacto, com intensidade de aplicação de $4,0 \text{ mm h}^{-1}$, pressão de serviço de 25 mca e vazão de 360 L h^{-1} . A avaliação da uniformidade de aplicação de água indicou um coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) igual a 90%. No dia seguinte à aplicação da irrigação, foram retiradas quatro amostras nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, para avaliação da umidade do solo. Em cada um dos experimentos, a irrigação foi realizada apenas uma vez. Posteriormente, foi feito o acompanhamento do secamento do solo.

No experimento ESC, foram instaladas plantas artificiais dentro dos ML. As plantas foram construídas com arame galvanizado e PETG de 0,75 mm de espessura. As folhas das plantas foram confeccionadas em formato circular e coladas a uma haste de arame galvanizado com altura de 10 cm, dos quais 5 cm foram enterrados no solo. Por fim, todas as plantas artificiais foram pintadas na cor verde. Nos MLs que receberam cobertura total, a folha artificial ocupou toda área do ML.

Após a instalação das plantas os MLs foram pesados. Para realização das pesagens utilizou-se uma balança digital modelo PRIX 9094 com resolução de 1g (de 0 kg até 3 kg) e 5 g (de 0 kg até 15 kg). A pesagem foi realizada entre as 08:30 e 09:00h no período da manhã. Durante o processo de pesagem foram tomados todos os cuidados para manter a estrutura do solo durante todo o período de estudo.

Demais dados coletados

Os elementos meteorológicos necessários para execução dos cálculos foram obtidos da estação meteorológica da Embrapa Cerrados, localizada a aproximadamente 2 km do experimento. Foram utilizados dados de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar.

A precipitação, devido a sua variabilidade, foi medida por meio de dois pluviômetros instalados na área experimental. A evapotranspiração de referência foi calculada pela equação FAO-Penman Monteith (ALLEN *et al.*, 1998).

Para avaliação da textura, curva de retenção de água e densidade do solo foram coletadas dezoito amostras de solo nas camadas de 0-20 e 20-40 cm. Para estimativa da textura utilizou-se o procedimento definido por Teixeira *et al.* (2017). Na construção da curva retenção utilizou-se a metodologia da mesa de tensão (LEAMER; SHAW, 1941) para os pontos de 1, 3, 6, 10, 33, 60 kPa e câmara de Richards (RICHARDS, 1947) para 800 e 1500 kPa. Para a densidade aparente foi utilizado o método do anel volumétrico (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

O solo foi classificado como argiloso, com 51, 12 e 37% de argila, silte e areia na camada de 0 a 20 cm e 52, 16 e 32% na camada de 20 a 40 cm, respectivamente. Para as camadas de 0 a 20 e 20 a 40 cm, as umidades do solo na capacidade de campo foram iguais a 0,35 e 0,34 m³ m⁻³, e os pontos de murcha permanente foram iguais a 0,23 e 0,22 m³ m⁻³, respectivamente.

Estimativa da evaporação direta da água do solo

A evaporação direta da água do solo foi calculada com base em amostras gravimétricas do solo (ESGRA), Equação 1, e pela variação de peso dos microlisímetros (ESML), equação 2.

$$ES_{GRA} = \frac{\sum(\theta v_{1i} - \theta v_{2i})Di}{t} \quad (1)$$

em que: θv_{1i} = umidade volumétrica no momento da primeira amostragem na i-ésima camada do solo, m³ m⁻³; θv_{2i} = umidade volumétrica no momento da segunda amostragem na i-ésima camada, m³ m⁻³; Di = profundidade da i-ésima camada, mm; e t = número de dias entre a amostragem sucessiva da umidade do solo.

$$ES_{ML} = \frac{\sum(P_i - P_{i+1})}{A_{ML}} \quad (2)$$

em que: P_i = peso do ML do dia anterior, kg; P_{i+1} = peso do ML do dia atual, kg, e A_{ML} = área do microlisímetro, m² (área ML = 0,017671 m²).

A umidade do solo foi determinada por meio do método gravimétrico. Amostras de solo foram retiradas diariamente na profundidade de 15 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 a obtenção do peso úmido e seco, obtinha-se a umidade atual do solo e procedia-se os cálculos da Es.

Análises estatísticas

Para avaliar o desempenho dos modelos desenvolvidos foram utilizados o coeficiente de determinação (r^2), o índice de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE) (NASH; SUTCLIFFE, 1970), erro de viés médio (MBE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) (RICHTER *et al.*, 2011; WILLMOTT; MATSUURA, 2005).

Para comparar as médias da Es acumulada (ΣEs) obtida para as diferentes alturas dos ML e também ΣEs para diferentes percentuais de coberturas do solo, utilizou-se o teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

2.3.3 Resultados e discussão

Dados climatológicos

Na Figura 2A apresenta-se os valores de temperatura média (Tmed) e ETo observados durante os três experimentos.

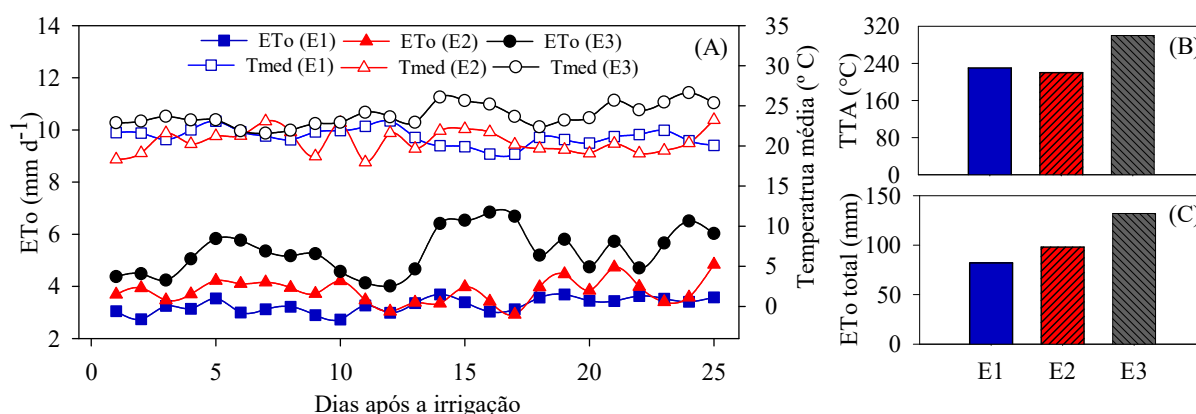


Figura 2. Valores de temperatura média (Tmed) e evapotranspiração de referência (ETo) (A), temperatura térmica acumulada (B) e evapotranspiração de referência total (ETo total) (C) observados nos três experimentos.

A Tmed variou de 19 a 23 °C, de 18 a 23 °C, e de 22 a 27 °C, para E1 (23/05 a 16/06), E2 (18/07 a 11/08) e E3 (21/08 a 14/09), respectivamente. Observa-se na Figura 2B que o maior valor de TTA ocorreu no E3, sendo este valor 31% e 38% maior que a TTA observada em E1 e E2, respectivamente.

A ETo, obtida pelo método de Penman Monteith, variou de 2,7 a 3,7, de 3,0 a 4,9, e de 3,7 a 8,8 mm d⁻¹, para E1, E2 e E3, respectivamente. A ETo total (Figura 2C), no experimento E3, foi 62% e 36% maior que a observado nos experimentos E1 e E2, respectivamente.

Evaporação do solo acumulada para diferentes alturas dos microlisímetros

Na Figura 3 são apresentados os valores das médias da EAML acumulada do DAI 1 até o DAI 5, do DAI 1 até o DAI 10 e do DAI 1 até o DAI 25, separadamente, para os experimentos E1, E2 e E3, nos tratamentos Ta1, Ta2 e Ta3.

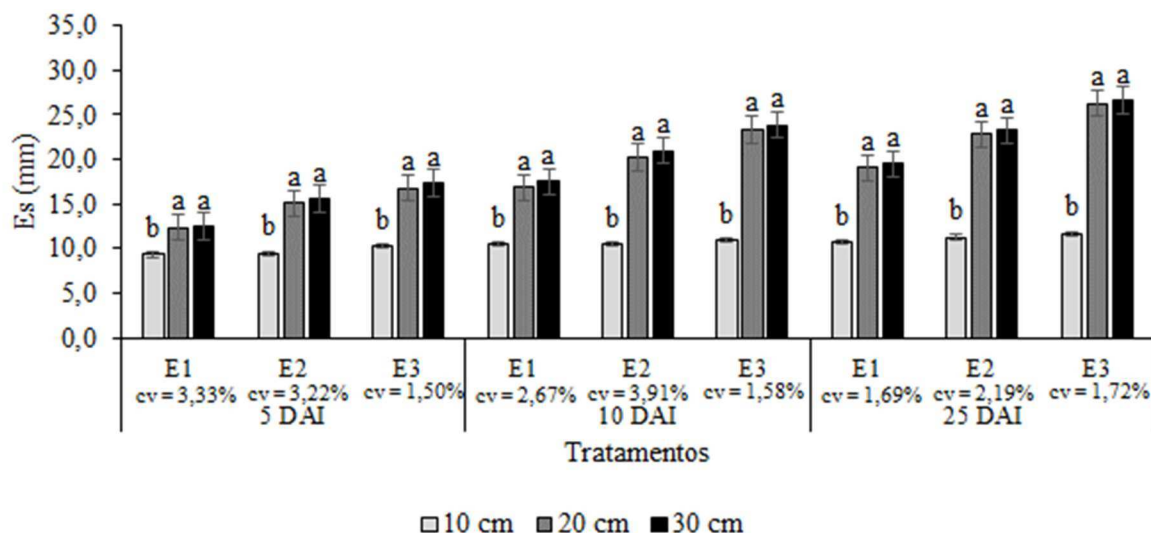


Figura 3. Médias da evaporação acumulada para as alturas dos microlisímetros de 100, 200 e 300 mm para os experimentos E1, E2 e E3, no DAI 5, DAI 10 e DAI 25.

Para o tratamento Ta1 (EAML = 10 cm), observou-se uma evaporação média total ($\Sigma \bar{E}t$) igual a 11,2 mm. Já para Ta2 (EAML = 20 cm) foi observado valor de $\Sigma \bar{E}t$ igual a 22,7 mm, enquanto que para Ta3 (EAML = 30 cm) a $\Sigma \bar{E}t$ foi da ordem de 23 mm (Figura 3). Para E_{SGRA} , a $\Sigma \bar{E}t$ foi igual a 22,6 mm. Não foram observadas diferenças estatísticas significativas ($CV=1,60$), teste de Tukey ($p<0,05$), entre os microlisímetros com alturas de 200 (Ta2), 300 mm (T3) e E_{SGRA} ; já entre os microlisímetros de 100 mm (Ta1) e 200 mm (Ta2), como também entre os microlisímetros de 100 mm (Ta1) e 300 mm (Ta3), houve diferenças estatísticas significativas ($p<0,05$).

Os valores de EAML acumulada em Ta1, quando comparada a Ta3, para o período do DAI 1 ao 5, foi cerca de 31, 42 e 43% menores nos E1, E2 e E3, respectivamente. Para o período DAI 1 ao 10, esses valores foram cerca de 42, 52 e 57% menores. Quando foi considerada a duração total dos experimentos E1, E2 e E3, os valores da EAML acumulada em Ta1 foram cerca de 48, 54 e 59% menores que Ta3, respectivamente.

Esse resultado pode ser justificado pelo fato de que a quantidade de água disponível no solo com potencial para ser evaporado ser diferente para cada tratamento (altura do ML). Para o solo em questão, que tem uma DTA (disponibilidade total de água no solo) igual a 1,2 mm cm^{-1} , a água disponível no solo (AD) é igual a 12, 24 e 36 mm, para as alturas de 100, 200 e 300 mm, respectivamente. Nesse caso, a água disponível para evaporar se esgota primeiro do

ML com altura igual a 100 mm. Baseando-se nesta observação, na diferença estatística significativa observada entre Ta1 e ESGRA, e na não significância estatística entre Ta2 e Ta3 e ESGRA, optou-se por utilizar o ML com 300 mm de altura.

Avaliação da evaporação diária para o experimento de secamento e de cobertura do solo

Considerando todo período de estudo, os valores diários da ESC variaram de 0,1 a 3,2 mm d⁻¹, para o tratamento T1 (solo descoberto), de 0,1 a 2,8 mm d⁻¹, para T2 (10% de cobertura do solo), de 0,1 a 2,4 mm d⁻¹, para T3 (25% de cobertura do solo), de 0,1 a 1,9 mm d⁻¹, para T4 (50% de cobertura do solo), de 0,1 a 1,6 mm d⁻¹, para T5 (75% de cobertura do solo), e de 0,1 a 1,0 mm d⁻¹, para T6 (100% de cobertura do solo) para o experimento 1 (E1). Para E2, a variação da evaporação foi de 0,1 a 3,9 mm d⁻¹, para T1, de 0,1 a 3,6 mm d⁻¹, para T2, de 0,1 a 2,8 mm d⁻¹, para T3, de 0,1 a 2,4 mm d⁻¹, para T4, de 0,1 a 2,1 mm d⁻¹, para T5, e de 0,1 a 1,2 mm d⁻¹, para T6. Por sua vez, em E3, a evaporação variou de 0,1 a 4,8 mm d⁻¹, para T1, de 0,1 a 4,1 mm d⁻¹ (T2), 0,1 a 3,7 mm d⁻¹ (T3), 0,1 a 2,9 mm d⁻¹ (T4), 0,1 a 2,3 mm d⁻¹ (T5), e 0,1 a 1,4 mm d⁻¹ (T6). Os maiores valores de evaporação, considerando os três experimentos, foram observados no primeiro dia após a irrigação. Para esta situação, E3 apresentou valores de evaporação maiores que E1 e E2 da ordem de 49, 46, 52, 54, 44 e 36% e 25, 14, 31, 22, 12 e 13% para os tratamentos T1, T2, T3, T4, T5 e T6, respectivamente.

A evaporação observada no DAI 1 para T1, no experimento 1, foi maior que a evaporação observada em T2, T3, T4, T5 e T6 em 13, 25, 38, 50 e 71%, respectivamente. No E2, essa diferença foi da ordem de 13, 25, 40, 47 e 74% e em E3 foi de 13, 24, 39, 51 e 74%. De maneira geral, a diferença da Es diária entre o solo descoberto (T1) e totalmente coberto (T6) foi da ordem de 74%. Yuan et al. (2009) observaram maior taxa de evaporação quando o solo estava descoberto, particularmente para teores elevados de umidade do solo, já na condição de solo coberto, foi observada grande redução na taxa de evaporação, principalmente para os maiores percentuais de cobertura. Dalmago et al. (2010) também observaram que em solos descobertos a Es é maior logo após a irrigação ou chuva, passando a diminuir com o passar dos dias após o umedecimento, corroborando os resultados obtidos neste trabalho.

Os maiores valores de Es diária observados no primeiro dia após a irrigação no E3 decorreram da maior demanda evapotranspirativa, com ETo maior da ordem de 30 e 16% em E3 quando comparado a E1 e E2, respectivamente. Os maiores valores de Es foram observados entre o DAI 1 e 5, quando o solo se encontrava na fase 1.

Ao contrário do que foi observado em outros trabalhos (PHILIP, 1957; GARDNER e HILLEL, 1962; SNYDER et al., 2000), entretanto, neste estudo foi observado que mesmo quando o solo se encontrava na fase 1 de evaporação, quando a Es é mais dependente da

demanda atmosférica, a taxa de Es diminuiu com os dias após o umedecimento, indicando uma influência da umidade do solo na evaporação. Outro aspecto que deve ser observado é que a espessura da camada do solo que influencia na taxa de evaporação parece ser maior que os valores de 10 a 15 cm normalmente recomendados (ALLEN et al., 1998; KROES et al., 2008).

Com a mudança do solo para a fase 2 de evaporação, foram observados menores valores de Es com decorrer dos DAI. Nesta fase, a Es passa a depender, entre outras coisas, da porosidade e da tortuosidade do meio poroso. Com a diminuição da disponibilidade de água, ocorre o decréscimo da umidade do solo com potencial para evaporar, resultando em menores valores de Es e no decaimento da taxa de Es. Na fase 2, a superfície do solo encontra-se seca, e a taxa de evaporação passa a depender do processo de difusão de vapor de água, justificando os valores menores da Es.

Outro aspecto que deve ser ressaltado é a importância da energia disponível para evaporação. À medida que se aumentou a cobertura do solo, a energia disponível para evaporação foi reduzida, influenciando diretamente a Es. Essa constatação fica mais evidente no caso específico do ML totalmente coberto, no qual, embora houvesse umidade no solo com potencial para manter a evaporação, após o oitavo dia após o umedecimento, a taxa de evaporação foi reduzida a praticamente zero.

Para os dados normalizados (Es/E_{To}), foram obtidos valores para DAI 1 da ordem de 0,95 para o tratamento T1, 0,83 (T2), 0,71 (T3), 0,56 (T4), 0,47 (T5) e 0,29 (T6) para E1. Quando se considerou E2, os valores foram da ordem de 0,98 (T1), 0,86 (T2), 0,71 (T3), 0,61 (T4), 0,52 (T5) e 0,30 (T6). Por fim, para E3, os valores foram de 0,97 (T1), 0,83 (T2), 0,74 (T3), 0,59 (T4), 0,46 (T5) e 0,27 (T6). Para os demais dias de estudo observou-se comportamento parecido entre os três experimentos.

Na análise dos valores acumulados da Es, observou-se que não houve diferença estatística significativa, teste Tukey, ($p < 0,05$), entre Es medida por gravimetria e a Es medida no ML sem cobertura. Os demais tratamentos com cobertura, para todos os experimentos, apresentaram diferença estatística significativa para os valores da ΣEs ML comparados com ES gravimetria. Para Klocke (2003), em condições de solo coberto, os resíduos da cultura podem reduzir a evaporação do solo pela metade. Yuan et al. (2009), estudando o efeito da cobertura do solo através de cascalho de diferentes diâmetros (0,5, 2,5, 4,5 cm e solo descoberto) durante 41 dias, notaram que a Es apresentou elevada redução com a diminuição do diâmetro, e consequentemente da área exposta dos cascalhos. Os autores ainda observaram que, enquanto o solo descoberto apresentou ΣEs de 76,52 mm, o solo coberto com cascalhos de 0,5 cm de diâmetro apresentou 12,57 mm. Como os cascalhos de 0,5 cm de diâmetro são menores, há

menor espaço para perda da água para a superfície. Neste estudo, observou-se comportamento similar.

Evaporação do solo acumulada normalizada em função da ETo durante todo o período de estudo

Na Figura 4 é apresentado o comportamento da evaporação do solo acumulada normalizada em função da ETo durante 25 dias, para todos os tratamentos, nos experimentos E1, E2 e E3.

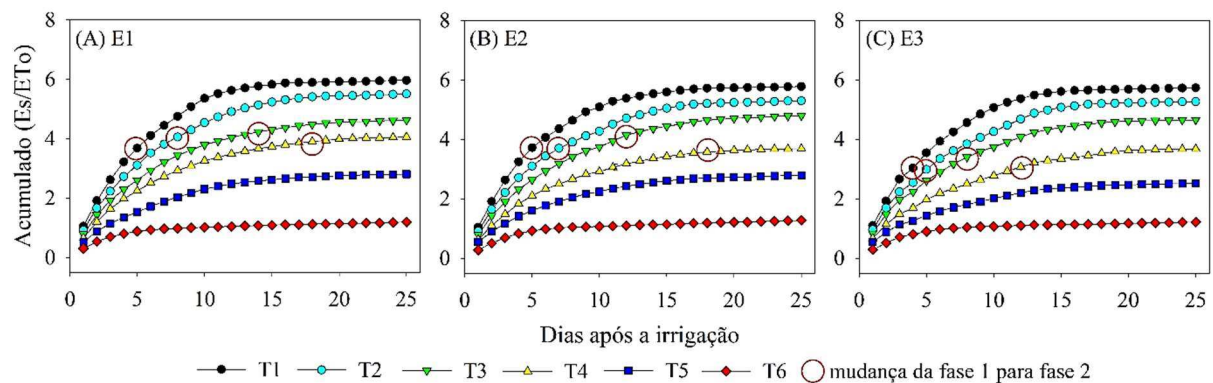


Figura 4. Evaporação do solo acumulada normalizada em função da evapotranspiração de referência (ETo) para os experimentos E1 (A), E2 (B) e E3 (C) e tratamentos T1 (solo descoberto), T2 (10% de CC), T3 (25% de CC), T4 (50% de CC), T5 (75% de CC) e T6 (100% de CC). O círculo vermelho indica o dia em que houve mudança da fase de evaporação 1 para a fase 2.

Com base na Figura 4, pode-se constatar que a partir do experimento com cobertura do solo igual a 75% (T5) o somatório da Es não foi maior que o parâmetro U (13 mm), que define a mudança da fase 1 para a fase 2 de evaporação. Isto é, nos experimentos T5 e T6 não ocorreu mudança de fase.

Visando viabilizar a modelagem da Es, com base nos valores da ΣEs normalizada pela ETo (Figura 4), foram gerados, em função do dia após irrigação e do tratamento, modelos para simulação do aumento da Es. Os modelos foram ajustados com base nos dados de evaporação dos experimentos E1 e E2 e validados pelo experimento E3, Equação 3. Os parâmetros dos modelos são apresentados na Tabela 1.

$$\Sigma Es = ETo (\alpha DAI^3 - b DAI^2 + c DAI + Yo) \quad (3)$$

em que α , b , c e Yo são parâmetros da equação.

Tabela 1. Parâmetros do modelo polinomial de terceira ordem ajustado aos dados acumulados da Es normalizada pela ETo para os diferentes percentuais de cobertura do solo.

Parâmetros	Tratamentos					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
α	0,00079	0,00048	0,00041	0,00034	0,00023	0,00022
b	0,04525	0,03054	0,02553	0,02105	0,01474	0,01049
c	0,85921	0,66409	0,55838	0,45785	0,32449	0,16831
Yo	0,36444	0,42472	0,38406	0,31569	0,28013	0,23324
r^2	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,96
SEE	0,054	0,056	0,044	0,043	0,016	0,043

SEE: erro padrão de estimativa

Com base no valor de r^2 , que variou entre 96 e 99%, observou-se um bom ajuste do modelo aos dados de Es acumulado. O erro padrão de estimativa foi próximo a zero, para todas as condições de estudo. Os valores dos parâmetros α , b e c decresceram com o passar dos DAI entre os tratamentos T1 e T6, já o parâmetro Yo apresentou queda a partir do tratamento T2.

Na Figura 5 apresenta-se o resultado da validação dos modelos com base nos valores de Es do experimento E3 para todos os tratamentos, com as respectivas métricas de avaliação da qualidade do modelo.

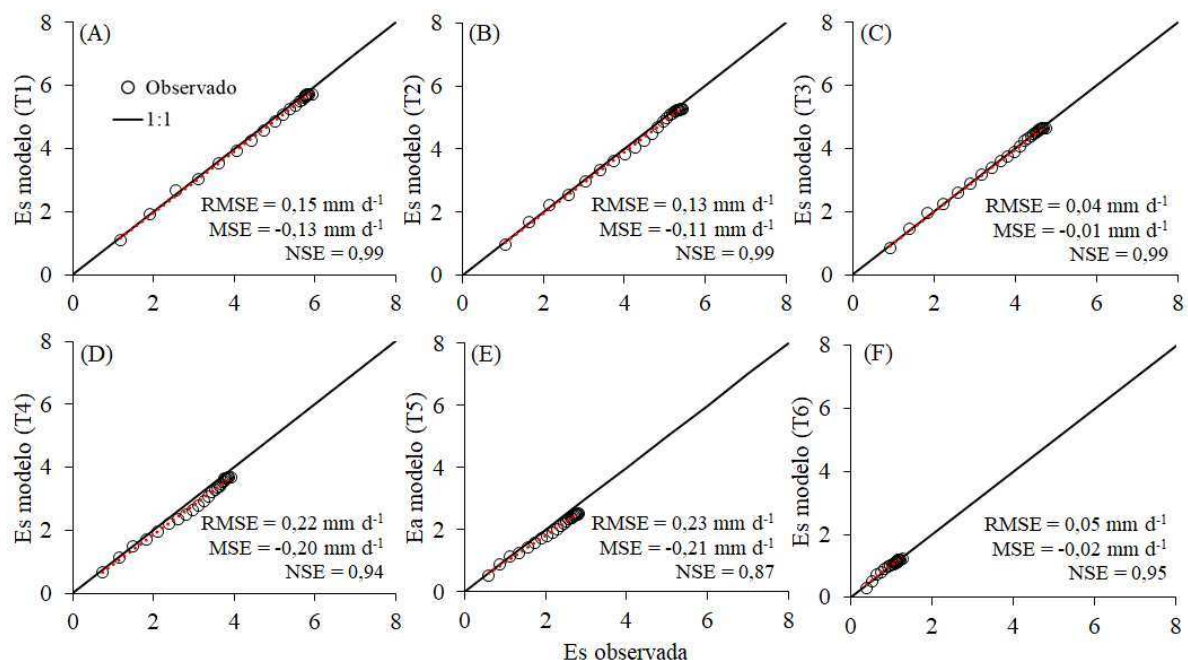


Figura 5. Validação dos modelos de estimativa de ΣEs normalizada em função da ETo para os tratamentos T1 (A), T2 (B), T3 (C), T4 (D), T5 (E) e T6 (F).

Nota-se na Figura 5 que os valores de RMSE variaram entre 0,04 e 0,23 mm d⁻¹, entre todos os tratamentos, indicando que os modelos ajustados apresentaram pequeno erro na estimativa dos valores da Es, quando comparado ao valor observado. Analisando a linha 1:1 e

os valores de MBE, foi constatado que os dados de Es obtido pelos modelos subestimaram os dados observados, para todos os tratamentos. Os valores de NSE variaram de 0,87 a 0,99, indicando bom ajuste do modelo, que segundo o critério proposto Collischonn (2001), valores de NSE maior que 0,75 indica desempenho adequado e bom do modelo.

Os modelos apresentados estimaram os valores de Es para um período de 25 dias, que engloba as três fases de evaporação direta da água do solo. Com base na metodologia proposta por Ritchie (1972), a mudança da fase 1 para a fase 2 de evaporação do solo se baseia no parâmetro U, que indica a lâmina de água que deve ser evaporada para ocorrer a mudança de fase. O valor obtido para o parâmetro U para o solo da área de estudo foi igual a 13 mm.

Neste trabalho, observou-se que além da cobertura do solo (Yuan et al., 2009) e da demanda evapotranspirométrica (Philip, 1957), a Es na fase 1 foi influenciada pela umidade disponível no solo para evaporação da água no solo. Tal afirmativa pode ser constatada pelo fato do valor da Es normalizada em função da ETo para uma mesma cobertura do solo decair com o passar dos DAI. Esse comportamento é importante de ser melhor investigado e pode levar a uma reanálise dos modelos de estimativa da evapotranspiração que particionam a Es e a T.

Outro aspecto interessante a ser destacado neste trabalho, é a observação da influência da demanda evapotranspirométrica nos primeiros dias da fase 2 de evaporação, como também observado por Wallace et al. (1999), levantando a necessidade de reanálise das equações que estimam a Es na fase 2 em função do inverso da raiz quadrada do tempo. Essa constatação pode levar também à necessidade de reavaliação do parâmetro U. Não ficou evidente, por sua vez, mudanças significativas que indicasse a transição da fase 2 para a fase 3.

Na agricultura irrigada, a frequência de irrigação, em geral, mantém a Es na fase 1 de evaporação, principalmente quando se trata de solos mais arenosos, com baixa capacidade de retenção de água. Em virtude deste fato, foram ajustados dois modelos com duas abordagens diferentes da Es, em que a primeira considerou os cinco primeiros dias da fase 1 relacionando-a com os percentuais de cobertura, e a segunda atentando-se a Es para cada percentual de cobertura em função dos dias após a irrigação.

Modelos para simulação da evaporação do solo na fase 1

Os modelos foram gerados utilizando-se o valor da taxa de Es normalizada pela ETo. Sua construção teve como objetivo simular a Es na fase 1, função do valor do parâmetro U (Ritchie, 1972) e do percentual de cobertura do solo. De forma geral, a Es permaneceu na fase 1 por cinco dias no ML descoberto (T1) para todos os experimentos. Para construção dos

modelos foram utilizados os dados de E_s dos experimentos E1 e E2, e para validação foi utilizado E3.

A evaporação do solo para os diferentes percentuais de cobertura do solo, nos cinco primeiros dias após a irrigação, se ajustou a um modelo polinomial de terceira ordem (equação 4). Os parâmetros da equação para os cinco DAI estão apresentados na Tabela 2.

$$E_s = ETo (\alpha CC^3 + b CC^2 - c CC + Y_o) \quad (4)$$

Tabela 2. Parâmetros do modelo polinomial de terceira ordem, ajustado aos dados de evaporação do solo para os diferentes percentuais de cobertura do solo, nos cinco primeiros dias após a irrigação (fim da fase 1 de evaporação).

Parâmetros	Tratamentos				
	DAI1	DAI2	DAI3	DAI4	DAI5
α	-1,07E-06	-8,20E-07	-9,18E-07	-9,15E-07	-7,34E-07
b	0,00017	0,00013	0,00015	0,00015	0,00011
c	0,0133	0,0110	0,0109	0,0103	0,0073
Y_o	0,9704	0,8520	0,7003	0,5984	0,4617
r^2	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99
SEE	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02

Os modelos se ajustaram aos dados observados com valor de r^2 médio igual a 99%, e SEE próximo a zero, para todas as condições de estudo. Os parâmetros α , c e Y_o diminuíram com o passar dos DAI, já o parâmetro b apresentou comportamento aleatório.

Na Figura 6 são apresentados o resultado da validação dos modelos, as equações da regressão e os coeficientes estatísticos r^2 , RMSE, MBE e NSE.

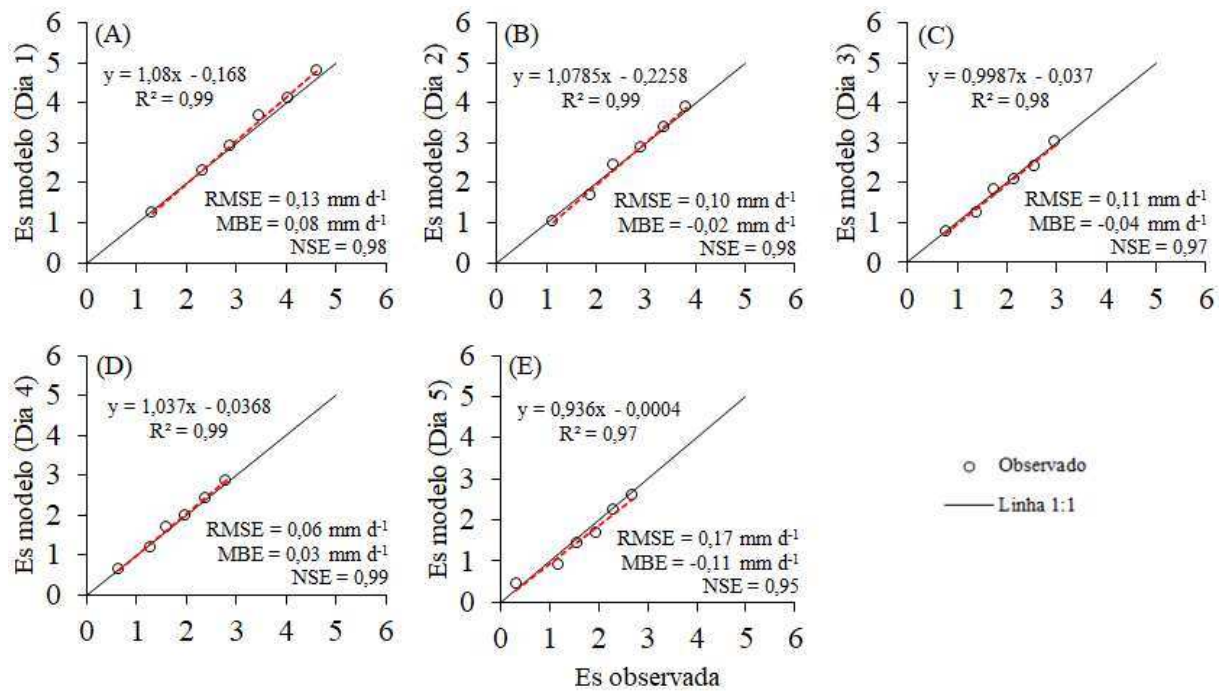


Figura 6. Evaporação direta da água do solo (Es) simulada pelos modelos em função da Es observada no experimento 3, considerando diferentes percentuais de cobertura do solo para o DAI 1 (A), DAI 2 (B), DAI 3 (C), DAI 4 (D) e DAI 5 (E).

Analisando a Figura 6, observou-se que entre os modelos, os valores de r^2 variaram entre 0,97 e 0,99, já o erro na estimativa dos valores de Es variou entre 0,06 e 0,17 mm d⁻¹, sendo o maior erro encontrado no DAI 5. Verificando a linha de tendência dos modelos em relação a linha 1:1 e os valores de MBE, observou-se que os modelos no DAI 1 e DAI 4 superestimaram os valores observados, enquanto os demais modelos apresentaram subestimativa. Quanto ao indicador de desempenho dos modelos para os cinco DAI, adotado neste trabalho o NSE, todos os modelos apresentaram valores de NSE maior que 0,75, apresentando desempenho adequado e bom, segundo classificação proposta por Collischonn (2001).

Ainda na fase 1 de evaporação do solo, foram desenvolvidos modelos para calcular a Es do solo para cada tratamento de cobertura em função do dia após umedecimento. Para desenvolvimento dos modelos, também foram utilizados os valores da taxa de Es normalizada pela ETo nos experimentos E1 e E2. Para validação dos modelos gerados, utilizou-se os dados observados de Es/ETo provenientes de E3.

Os dados observados ajustaram-se ao modelo exponencial decrescente com dois parâmetros. Os parâmetros da equação 5, para todos os tratamentos, estão apresentados na Tabela 3.

$$Es = ETo \left[\alpha \exp^{(-b \text{ DAI})} \right] \quad (5)$$

Analisando a Tabela 3, nota-se que o parâmetro α decresceu com a diminuição dos valores de E_s , decorrentes do aumento da cobertura do solo. Por sua vez, o parâmetro b se comportou de forma aleatória. Os valores de r^2 variaram entre 0,98 e 0,99 para todos os tratamentos, já o erro da estimativa (SEE) se aproximou de zero.

Tabela 3. Parâmetros do modelo exponencial, ajustado aos dados de evaporação do solo para os diferentes percentuais de cobertura do solo na fase 1 de evaporação.

Parâmetros	Tratamentos					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
α	1,167	1,034	0,861	0,694	0,575	0,417
b	-0,169	-0,185	-0,170	-0,160	-0,193	-0,310
r^2	0,98	0,99	0,98	0,99	0,99	0,98
SEE	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02	0,012

Na Figura 7 apresenta-se os modelos ajustados aos dados observados para todos os tratamentos. Para realização do ajuste foram considerados apenas os dados observados referentes a fase 1 de evaporação da água direta do solo, tendo em vista que essa é uma das fases mais importantes para a agricultura irrigada. Posteriormente, foram utilizadas as métricas RMSE, MBE e NSE para conhecer a qualidade do ajuste.

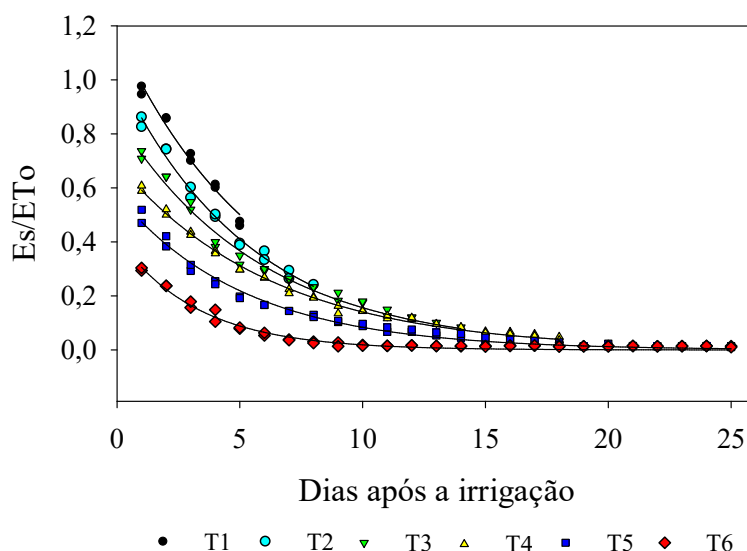


Figura 7. Modelos para cálculo da evaporação direta da água do solo nos diferentes tratamentos durante a fase 1 de evaporação da água do solo.

O RMSE obtido na validação dos modelos nos tratamentos T1 e T2 foi de aproximadamente $0,13 \text{ mm d}^{-1}$. Para os demais tratamentos, os valores de RMSE foram ainda menores, variando de $0,05$ a $0,10 \text{ mm d}^{-1}$. Avaliando os valores de MBE e a linha 1:1, não se

identificou tendências de sub ou superestimativa dos valores, indicando um comportamento bem aderente do modelo. Com base nos valores de NSE, o desempenho dos modelos foi satisfatório.

Comparação da estimativa da evaporação do solo nas fases 1 e 2 com a estimativa dos modelos gerados para a fase 1 e o modelo de Ritchie

Inicialmente, foi calculado o valor do parâmetro α para o tratamento sem cobertura, seguindo o proposto por Ritchie (1972). O valor de α consiste da inclinação da reta originária da regressão linear entre os dados da ΣEs na fase 2 e a raiz quadrada do tempo, em dias. Para esse estudo o valor de α foi igual a $4,83 \text{ mm d}^{-0,5}$.

Na Figura 8 são apresentados, em função do dia após a irrigação, para todos os tratamentos, os valores de Es observados, simulados para a fase 1 com base no modelo gerado neste trabalho (Es proposta) e no modelo de Ritchie e simulados para a fase 2, com base no modelo de Ritchie.

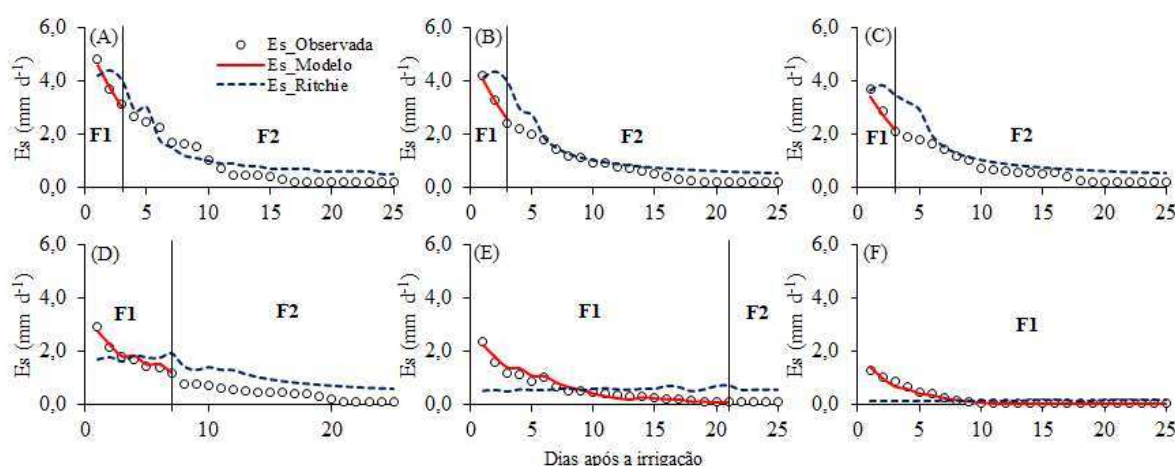


Figura 8. Evaporação direta da água do solo (Es) observada e simulada pelo novo modelo e pelo modelo de Ritchie em função do dia após a irrigação (DAI) durante a fase 1 e fase 2 para os tratamentos T1 (A), T2 (B), T3 (C), T4 (D), T5 (E) e T6 (F).

Para a fase 1, a Es proposta apresentou NSE médio de 0,90, para todos os tratamentos na fase 1, baixos valores RMSE e MBE, o que o classifica como um modelo de desempenho adequado e bom. O modelo de Ritchie só apresentou desempenho aceitável nos tratamentos T1 (NSE = 0,69), T2 (NSE = 0,70), T3 (NSE = 0,51) e T4 (NSE = 0,38), nas condições de menores percentuais de cobertura do solo. Nas demais relações entre os valores observados e o modelo de Ritchie, quando a cobertura do solo aumentou, o RMSE médio foi maior que $1,00 \text{ mm d}^{-1}$, com subestimativa do valor observado e NSE apresentando desempenho insatisfatório.

Considerando a diferença entre os valores de $\sum Es$ observada com valores simulados pelo novo modelo, e também o modelo de Ritchie, foi possível saber o quanto de água em metros cúbicos poderia ser aplicada em excesso ou escassez considerando uma área irrigada de 100 ha. Enquanto para os tratamentos T1, T2 e T3, utilizando o novo modelo, foram aplicados 330, 170 e 250 m³ a mais de água, respectivamente, quando se utilizou o modelo de Ritchie deixou-se de aplicar 960, 2.510 e 2.290 m³ para os mesmos tratamentos. Para os tratamentos T4, T5 e T6, foi observado efeito contrário quanto ao excesso ou escassez da quantidade de água aplicada, enquanto a utilização do novo modelo gerou 380, 130 e 10 m³ de escassez de água para os tratamentos T4, T5 e T6, respectivamente, o modelo de Ritchie foi responsável por 250, 290 e 2.080 m³ de excesso de água para T4, T5 e T6, respectivamente. De forma geral, para o novo modelo foi aplicado o excesso de 270 m³ de água, enquanto para o modelo de Ritchie deixaram de ser aplicados 3.140 m³. Uma possível justificativa para este ocorrido foi observada por Wallace et al. (1999), que afirmou ser o modelo de Ritchie (1972) incapaz de prever a evaporação diária do solo com precisão, mas ser capaz de fornecer boas estimativas da evaporação acumulada do solo para períodos de semanas e meses.

Apesar do baixo desempenho do modelo de Ritchie na fase 1, na fase 2 o modelo apresentou qualidade do ajuste nos tratamentos de até 25% (T1, T2 e T3), demonstrando ser mais eficiente em calcular a evaporação do solo com menor cobertura.

2.3.4 Conclusões

A evaporação acumulada para os microlisímetros de 100 mm de altura foi menor, quando compara aos microlisímetros com 200 e 300 mm de altura.

Para estudos que pretendam medir a evaporação acumulada durante períodos maiores que cinco dias, recomenda-se utilizar os microlisímetros de 200 e 300 mm de altura.

Os modelos desenvolvidos para calcular a Es diária durante os cinco primeiros dias após a irrigação para diferentes percentuais de cobertura, apresentaram desempenho satisfatório (NSE>0,95).

Os modelos que calculam a Es diária durante a fase 1 de evaporação do solo, para todos os tratamentos de forma separada, apresentaram desempenho satisfatório (NSE>0,97).

Para as fases 1 e 2 de evaporação direta da água do solo, o modelo de Ritchie só apresentou desempenho satisfatório até 50% da cobertura do solo.

2.3.5 Agradecimentos

Este estudo teve apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Distrito Federal (projeto Termo de Outorga 541/2016 FAPDF), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

(EMBRAPA Cerrados - projeto 20.18.01.015.00.06.006), Universidade Federal de Viçosa (UFV) e em parte, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - código financeiro 001, e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Bolsa número 870171 / 1997-6.

2.3.6 Referências

AGAM, N. Comment on “Microlysimeter station 1 for long term non-rainfall water input and evaporation studies” by Uclés *et al.* **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 194, p. 255–256, 15 ago. 2014.

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

AGROSATÉLITE, ABIOVE. **Análise geoespacial da soja no bioma Cerrado: dinâmica da expansão | aptidão agrícola da soja | sistema de avaliação para compensação financeira: 2001 a 2019**. Florianópolis: 2020.

ALLEN, R. G. *et al.* **Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements**. **FAO Irrigation and drainage paper 56**. Roma, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

ALLEN, R. G. *et al.* **Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos [Crop evapotranspiration: Guidelines for determination of water requirements of crops]**. Rome: Food and Agriculture Organization. Rome. [s.l.] FAO Rome, Italy, 2006.

ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N. The expansion of center-pivot irrigation in the Cerrado Biome. **IRRIGA**, v. 1, n. 1, p. 56–61, 30 out. 2019.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.

BARIVIERA, G. *et al.* Dual crop coefficient for the early-cycle soybean cultivar SoyTech 815 RR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 2, p. 75–81, fev. 2020.

BLACK, T. A.; GARDNER, W. R.; THURTELL, G. W. The Prediction of Evaporation, Drainage, and Soil Water Storage for a Bare Soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 33, n. 5, p. 655–660, 1969.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica em grandes bacias**. Porto Alegre: UFRGS, 2001. 194p. Tese Doutorado.

DAAMEN, C. C. *et al.* Use of microlysimeters to measure evaporation from sandy soils. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 65, n. 3, p. 159–173, 1 ago. 1993.

DALMAGO, G. A. *et al.* Evaporação da água na superfície do solo em sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 8, p. 780–790, 2010.

FARIA JUNIOR, C. A. *et al.* Coeficiente dual de cultivo do milho pipoca em Tangará da Serra – MT. **IRRIGA**, v. 24, n. 3, p. 473–485, 27 set. 2019.

FEIGENWINTER, C. *et al.* On the performance of microlysimeters to measure non-rainfall water input in a hyper-arid environment with focus on fog contribution. **Journal of Arid Environments**, v. 182, p. 104260, 1 nov. 2020.

FLUMIGNAN, D. L.; FARIA, R. T. DE; LENA, B. P. Test of a microlysimeter for measurement of soil evaporation. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 1, p. 80–90, 2012.

GARDNER, W. R.; HILLEL, D. I. The relation of external evaporative conditions to the drying of soils. **J. Geophys. Res.** 67: 4319-4325, 1962.

HANKS, R. J.; ASHCROFT, G. L. **Applied soil physics**. [s.l.] Springer-Verlag, New York, 1980.

HILLEL, D. Introduction to soil physics. 1980.

HSIAO, T. C. *et al.* AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 448–459, 2009.

IDSO, S. B. *et al.* The Three Stages of Drying of a Field Soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 38, n. 5, p. 831–837, 1974.

JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; PRATT, B. J. Estimating Soil Moisture Depletion from Climate, Crop and Soil Data. **Transaction of the ASAE**, v. 14, n. 5, p. 954–959, 1971.

KLOCKE, N. L. *et al.* Evaporation measurements and predictions from soils under crop canopies. **Transactions of the ASAE**, v. 33, n. 5, p. 1–1596, 1990.

KLOCKE, N. L. **Water savings from crop residue in irrigated corn**. 15th annual Central Plains Irrigation Conference and Exposition proceedings, February 4-5, 2003, Colby, Kansas. **Anais...Colorado State University. Libraries**, 2003

KLOCKE, N. L.; HEERMANN, D. F.; DUKE, H. R. Measurement of evaporation and transportation with lysimeters. **Transactions of the ASAE**, v. 28, n. 1, p. 183– 0189, 1985.

KROES, J. G. *et al.* SWAP Version 3.2. Theory description and user manual. p. 262, 2008.

LEAMER, R. W.; SHAW, B. A Simple Apparatus for Measuring Noncapillary Porosity on an Extensive Scale 1. **Agronomy Journal**, v. 33, n. 11, p. 1003–1008, 1 nov. 1941.

LEMON, E. R. The Potentialities for Decreasing Soil Moisture Evaporation Loss. **Soil Science Society of America Journal**, v. 20, n. 1, p. 120–125, 1956.

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.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Agrostat. Brasília: MAPA, 2020. Disponível em: <<http://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm>>. Acesso em: abril. 2020.

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

NINARI, N.; BERLINER, P. R. The role of dew in the water and heat balance of bare loess soil in the Negev Desert: quantifying the actual dew deposition on the soil surface. **Atmospheric Research**, 2nd International Conference on Fog and Fog Collection. v. 64, n. 1, p. 323–334, 1 set. 2002.

PHILIP, J. R. Evaporation, and moisture and heat fields in the soil. **Journal of meteorology**, v. 14, n. 4, p. 354–366, 1957.

QUINN, R.; PARKER, A.; RUSHTON, K. Evaporation from bare soil: Lysimeter experiments in sand dams interpreted using conceptual and numerical models. **Journal of Hydrology**, v. 564, p. 909–915, 1 set. 2018.

RAES, D. *et al.* 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.

RAZ-YASEEF, N.; ROTENBERG, E.; YAKIR, D. Effects of spatial variations in soil evaporation caused by tree shading on water flux partitioning in a semi-arid pine forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 3, p. 454–462, 15 mar. 2010.

RICHARDS, L. A. Pressure membrane apparatus - Construction and use. **Agronomy Engineering**, v. 28, p. 451–454, 1947.

RICHTER, K. *et al.* **Goodness-of-fit measures: what do they tell about vegetation variable retrieval performance from Earth observation data.** Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIII. **Anais...** In: REMOTE SENSING FOR AGRICULTURE, ECOSYSTEMS, AND HYDROLOGY XIII. International Society for Optics and Photonics, 7 out. 2011. Disponível em: <<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/8174/81740R/Goodness-of-fit-measures--what-do-they-tell-about/10.1117/12.897980.short>>. Acesso em: 27 jun. 2020

RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, v. 8, n. 5, p. 1204–1213, out. 1972.

RODRIGUES, L. N. *et al.* O modelo de Ritchie na determinação da evapotranspiração do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado. **Ceres**, v. 44, n. 252, 1997.

RODRIGUES, L. N. *et al.* Modelo de Ritchie: descrição e aplicação. **Embrapa Cerrados. Documentos**, 2005.

RODRIGUES, L. N.; PRUSKI, F. F. Fundamentos e benefícios do sistema de integração lavoura-pecuária-floresta para os recursos hídricos. **Embrapa Cerrados-Capítulo em livro técnico (INFOTECA-E)**, 2019.

SCHNEIDER, A. D. (USDA-A. R. S.) *et al.* A simplified weighing lysimeter for monolithic or reconstructed soils. **Applied engineering in agriculture (USA)**, 1998.

SILVA, E. H. F. M. *et al.* Soybean irrigation requirements and canopy-atmosphere coupling in Southern Brazil. **Agricultural Water Management**, 218, 1-7, 2019.

SNYDER, R.; BALI, K.; VENTURA, F.; GOMEZ-MACPHERSON, H. Estimating evaporation from bare or nearly bare soil. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 126, n.6, p.399-403, 2000.

SOARES, W. R. *et al.* Dependence of the crop coefficient in the initial stage of crop development (K_c ini) upon irrigation depth and soil texture. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 23–27, abr. 2001.

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

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. [s.l.] Brasília, DF: Embrapa, 2017., 2017.

UCLÉS, O. *et al.* Microlysimeter station for long term non-rainfall water input and evaporation studies. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 182–183, p. 13–20, dez. 2013.

WALLACE, J. S.; JACKSON, N. A.; ONG, C. K. Modelling soil evaporation in an agroforestry system in Kenya. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 94, n. 3, p. 189–202, 3 maio 1999.

WILLMOTT, C.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate Research**, v. 30, p. 79–82, 2005.

YUAN, C. *et al.* Soil surface evaporation processes under mulches of different sized gravel. **CATENA**, v. 78, n. 2, p. 117–121, 15 ago. 2009.

3 Conclusões gerais

Quanto ao crescimento da soja, a altura média da planta foi 52% menor para o tratamento T5 (80 a 100% de déficit) quando comparado a T1 (0 a 20% de déficit) no inverno, sendo essa mesma diferença da ordem de 39% no verão. Nesta mesma condição, as plantas no T5 apresentam IAF 50% menor que T1 no inverno, e 40% menor no verão. Apresentando a mesma tendência, o percentual de cobertura do solo foi cerca de 43% menor no tratamento T5, quando comparado a T1 no inverno, e 36% no verão.

De maneira geral, analisando os dois experimentos, o modelo de Jensen e Heermann, com NSE médio igual a 0,65, foi o que melhor representou a evapotranspiração atual da cultura da soja na região do Cerrado, seguido pelo modelo FAO56 Dual com NSE médio igual a 0,60. Na sequência, desataca-se o modelo AquaCrop, com NSE médio de 0,48. O modelo de Ritchie só apresentou bom desempenho no experimento de verão. Dentre os modelos avaliados, o modelo de Ritchie foi o que apresentou, de maneira geral, o pior desempenho na estimativa da evapotranspiração atual.

A evaporação acumulada foi menor nos microlisímetros com 100 mm de altura, quando compara aos microlisímetros com 200 e 300 mm. De forma geral, para todo o período, essa diferença foi da ordem de 52% (T2) e 53% (T3). Entre os microlisímetros de 200 e 300 mm não se observou diferença na evaporação, para nenhum dos experimentos e períodos da Es acumulada. Quando comparado com o método gravimétrico, os microlisímetros de 200 e 300 mm foram iguais na determinação da Es.

Os modelos desenvolvidos para calcular a Es diária durante os cinco primeiros dias após a irrigação para diferentes percentuais de cobertura, apresentou desempenho satisfatório ($NSE > 0,95$), e erro máximo da ordem de $0,17 \text{ mm d}^{-1}$ para o DAI 5. Para os modelos que calculam a Es diária durante a fase 1 de evaporação do solo, para todos os tratamentos de forma separada, foram obtidos valores de $NSE > 0,97$, e RMSE máximo igual a $0,14 \text{ mm d}^{-1}$, entre todos os tratamentos. Não houve tendência de subestimativa nem superestimativa entre os dados modelados e observados. Para as fases 1 e 2 de direta da água do solo o modelo de Ritchie só apresentou desempenho satisfatório nos tratamentos T1, T2 e T3 ($NSE > 0,51$).