



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**DESEMPENHO DA CULTURA DA SOJA SOB DIFERENTES
TEORES DE UMIDADE DO SOLO E AJUSTE DO MODELO DE
RITCHIE**

DOUGLAS RAMOS LORENA

TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

BRASÍLIA/DF
AGOSTO DE 2025



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**DESEMPENHO DA CULTURA DA SOJA SOB DIFERENTES
TEORES DE UMIDADE DO SOLO E AJUSTE DO MODELO DE
RITCHIE**

DOUGLAS RAMOS LORENA

ORIENTADO POR: DR. DELVIO SANDRI
COORIENTADOR: DR. LINEU NEIVA RODRIGUES

TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

PUBLICAÇÃO: TESE/2025

BRASÍLIA/DF
AGOSTO DE 2025



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**DESEMPENHO DA CULTURA DA SOJA SOB DIFERENTES TEORES
DE UMIDADE DO SOLO E AJUSTE DO MODELO DE RITCHIE**

DOUGLAS RAMOS LORENA

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO
DO GRAU DE DOUTOR EM AGRONOMIA.**

APROVADA POR:

Delvio Sandri, Prof. Dr. FAV/Universidade de Brasília. Orientador

João José da Silva Junior, Prof. Dr. FAV/Universidade de Brasília. Examinador titular interno

José Alves Junior – Escola de Agronomia/UFG – Examinador titular externo

Maria Emília Borges Alves - Embrapa Cerrados - Examinador titular externo

Jordana Moura Caetano, Profa. Dra. FAV/Universidade de Brasília. Suplente

Brasília/DF, agosto de 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Lorena, Douglas Ramos

Desempenho da cultura da soja sob diferentes teores de umidade do solo e ajuste do modelo de Ritchie. /Douglas Ramos Lorena, orientação Delvio Sandri, coorientador
Lineu Neiva Rodrigues – Brasília, 2025.

109 p.: il.

Tese de Doutorado (D) – Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2025.

1. Manejo de irrigação. 2. *Glycine max* L. 3. Índice SPAD. 4. Umidade do solo.
I. Delvio Sandri, Lineu Neiva Rodrigues. II. Irrigação, III. Título

CDD ou CDU
Agris/FAO

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LORENA, D. R. Desempenho da cultura da soja sob diferentes teores de umidade do solo e ajuste do modelo de Ritchie. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2025, 109p. Tese de Doutorado.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Douglas Ramos Lorena

TÍTULO DA TESE: Desempenho da cultura da soja sob diferentes teores de umidade do solo e ajuste do modelo de Ritchie.

GRAU: Doutor em Agronomia ANO: 2025

É concedida à Universidade de Brasília de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais, de publicação. Nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada à fonte.

Nome: Douglas Ramos Lorena

CPF: 027824011-90

Endereço: Quadra 04 Norte Lote: 102 “A” – Brazlândia/DF

Tel. (61) 99606 – 2414, Email: douglasramoslorena@gmail.com

Dedico esse trabalho a Deus e aos meus familiares
por sempre me incentivar.
Muito Obrigado!!!

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Ana Carlyne e a minha filha Olívia pela companhia, dedicação e por proporcionar os momentos mais felizes da minha vida.

Aos meus pais Edilson Magalhães Lorena e Francineide Ramos Bezerra pelo apoio, carinho, compreensão, amor e dedicação por todos esses anos.

À minha irmã Sarah, que mesmo sendo a caçula estava sempre com um sorrisinho no rosto e mesmo sem querer era um motivo de descontração. À Dayanne Cristina por caminhar sempre ao meu lado desde ensino fundamental, sempre tendo uma palavra amiga nos momentos mais difíceis.

À toda a minha família, tios, primos, avó e avô por me incentivarem a prosseguir nessa caminhada.

À minha segunda família, Dona Jô, Seu Neto, Ju, Tony e João e Duda por me fazerem sentir em casa quando não estava.

Aos Engenheiro agrônomo Orlando Viana, Diego Bispo, Elvis Alves e Silas Silva pela companhia, conselhos e por tornar esta jornada muito mais agradável.

Ao meu orientador Dr. Delvio Sandri e ao meu coorientador Dr. Lineu Neiva Rodrigues pelo conhecimento compartilhado, pelo auxílio e pela paciência em ensinar, não medindo esforços para conclusão deste trabalho.

Aos professores da Faculdade de Agronomia pelo entusiasmo demonstrado em sala de aula, exercendo a profissão sempre com amor e dedicação e aos servidores e técnicos pelo trabalho que muitas vezes não é percebido, mas é imprescindível.

À toda equipe de funcionários da Embrapa Cerrados pelo auxílio para a realização desse trabalho.

RESUMO

A demanda de água no manejo racional da irrigação é para atender a demanda evapotranspirométrica das plantas, podendo ser viabilizado por diferentes metodologias, dentre elas a estimativa a partir de modelos matemáticos-computacionais como o de Ritchie, que considera as condições microclimáticas locais. Ao mesmo tempo, o desempenho da cultura da soja é influenciado pela quantidade de água aplicada via sistema de irrigação. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho da cultura da soja submetida a diferentes níveis de umidade no solo utilizando a irrigação por microaspersão e gotejamento subsuperficial e ajustar os parâmetros U e α do modelo de Ritchie para estimativa da evapotranspiração potencial e realizar a análise da viabilidade econômica da cultura da soja no Distrito Federal considerando os custos de produção fixos e variáveis. Foram conduzidos três ciclos de cultivo da soja, o primeiro, denominado de C1, em 2019, C2, realizado em 2020, ambos irrigados por microaspersão e o terceiro ciclo utilizando o gotejamento subsuperficial (GS) no ano de 2020. O experimento foi realizado em condições de campo no Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (CPAC), utilizando o delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições (blocos), tanto utilizando a irrigação por microaspersão quanto o gotejamento subsuperficial. No ciclo C1, os tratamentos corresponderam à lâmina de irrigação suficiente para elevar a umidade do solo à 1,0, 0,8, 0,6, 0,4 e 0,2 da capacidade total de água no solo (CTA), identificados como M1C1 (T1), M2C1 (T2), M3C1 (T3), M4C1 (T4) e M5C1 (T5), respectivamente. No ciclo C2, o déficit hídrico utilizado correspondeu ao fator de depleção de água no solo (f), sendo que M1C2 (T1) representou um f de 0,1, M2C2 (T2) de 0,2, M3C2 (T3) de 0,3, M4C2 (T4) de 0,5 e M5C2 (T5) de 0,7. No ciclo de cultivo C1 foi avaliado o peso de mil sementes (PMS), número de nós por planta (NNp), número de vagem por planta (NVp) altura de planta (AP), índice SPAD e a produtividade (Prod). No ciclo C2 foi avaliado o comprimento de vagem (CVa), diâmetro das sementes (DSe), altura da planta (AP), número total de sementes por planta (NTe), semente viáveis por planta (SVi), número de nós por planta (NNOS), semente abortada por planta (SAp) número de vagens por planta (NVa), peso seco da haste (PSh), peso seco da vagem (PsV) preso de mil sementes (PMS), profundidade de raiz (PRa), índice cobertura do solo (ICS), índice SPAD e produtividade (Prod). No ciclo de cultivo com GS foi avaliado o Peso de mil grãos (PMG), comprimento de raiz (CR) e produtividade (Prod). Nos ciclos de cultivo C1 e C2 foi realizada análise econômica para o primeiro e segundo semestre de 2024 e primeiro de 2025. Os resultados foram submetidos à análise de variância e teste de média e aplicação de modelos de regressão quando pertinente. Foi ajustado os

parâmetros U (lâmina de evaporação acumulada) e α (constante de difusividade da água na superfície do solo durante a fase 2 de secagem do solo) do modelo de Ritchie para as quantidades de massa seca de palhada de milho de 0 (P0), 3 (P3), 6 (P6), 9 (P9) e 12 (P12) t ha⁻¹ em microlisímetros de pesagem irrigados por aspersão convencional. A produtividade usando a microaspersão no ciclo C1 em 2019 reduziu com a diminuição dos percentuais de água no solo com maior valor de 3.472,3 kg ha⁻¹ e menor de 2.237,0 kg ha⁻¹. Já usando o GS não houve variação de produtividade em função de diferentes níveis de estresse hídrico no solo, influenciado pela precipitação natural em parte do ciclo. Em todas as datas avaliadas e em função do fator de depleção de água no solo (f) utilizando a microaspersão em 2020 (C2), o índice de cobertura do solo (ICS) apresentou comportamento linear com o desenvolvimento da cultura da soja alcançando o seu valor máximo de 86,43% aos 55 DAS. O total de sementes por planta e o número de vagens por planta utilizando a microaspersão em 2020 (C2) reduziram progressivamente em função do fator f de 0,1 em direção a 0,7, ao mesmo tempo, nesse mesmo ciclo, o maior peso médio de mil grãos foi obtido com f de 0,1. O índice SPAD da cultura da soja irrigada por microaspersão no ano de 2019 (C1), apresentou diferenças significativas apenas aos 115 e 125 dias após a semeadura (DAS), já utilizando microaspersão no ano de 2020 (C2), com f de 0,3 foi o que apresentou maiores valores do índice SPAD no período de 27 a 62 DAS, e elevação dos índices a partir de 62 DAS até 97 DAS para todos os valores de f . No ajuste do modelo de Ritchie, a aumento dos níveis de palhada de milho no solo em microlisímetros de pesagem diminuiu a quantidade de água evaporada necessária para que ocorresse a mudança de fase 1 para a fase 2. À medida que os níveis de cobertura no solo aumentaram, os valores de U diminuíram. O parâmetro α do modelo de Ritchie se elevou com o aumento dos níveis de palhada de milho até 10 t ha⁻¹. Não houve viabilidade econômica considerando apenas os ganhos da venda de um único ciclo de cultivo da soja irrigada por microaspersão nos anos de 2024 e 2025 em Brasília-DF.

Palavras-chave: Manejo de irrigação. *Glycine max* L. Índice SPAD. Umidade do solo.

ABSTRACT

Water demand in rational irrigation management is to meet the evapotranspiration demand of plants, which can be achieved through various methodologies, including estimates based on mathematical-computational models such as Ritchie, which consider local microclimatic conditions. At the same time, soybean crop performance is influenced by the amount of water applied via the irrigation system. Therefore, the objective of this study was to adjust the U and α parameters of the Ritchie model to estimate potential evapotranspiration and soybean crop performance under different soil moisture levels using microsprinkler and subsurface drip irrigation, as well as to analyze the economic viability of soybean cultivation in the Federal District. Three soybean cultivation cycles were conducted: the first, designated C1, in 2019; C2, carried out in 2020, irrigated by microsprinkler irrigation; and the third cycle using subsurface drip irrigation (SG) in 2020. The experiment was carried out under field conditions at the Cerrado Agricultural Research Center (CPAC), using a randomized complete block design with four replicates (blocks), using both microsprinkler irrigation and subsurface drip irrigation. In cycle C1, the treatments corresponded to the irrigation depth sufficient to raise soil moisture to 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, and 0.2 of the total soil water capacity (TSC), identified as M1C1 (T1), M2C1 (T2), M3C1 (T3), M4C1 (T4), and M5C1 (T5), respectively. In cycle C2, the water deficit used corresponded to the soil water depletion factor (f), with M1C2 (T1) representing an f of 0.1, M2C2 (T2) of 0.2, M3C2 (T3) of 0.3, M4C2 (T4) of 0.5 and M5C2 (T5) of 0.7. Using subsurface drip in 2020, different periods of soil water stress were applied, being GS1 (7 days without irrigation), GS2 (14 days without irrigation), GS3 (21 days without irrigation), GS4 (30 days without irrigation) and GS5 (without irrigation throughout the soybean cycle). In the C1 cultivation cycle, the weight of a thousand seeds (PMS), number of nodes per plant (NNp), number of pods per plant (NVp), plant height (AP), SPAD index and productivity (Prod) were evaluated. In cycle C2, the following were evaluated: pod length (CVa), seed diameter (DSe), plant height (AP), total number of seeds per plant (NTE), viable seeds per plant (SVi), number of nodes per plant (NNOS), aborted seed per plant (SAp), number of pods per plant (NVa), stem dry weight (PSh), pod dry weight (PsV), thousand seed set (PMS), root depth (PRa), soil cover index (ICS), SPAD index and productivity (Prod). In the cultivation with GS, the thousand grain weight (PMG), root length (CR) and productivity (Prod) were evaluated. In the cultivation cycles C1 and C2, an economic analysis was performed for the first and second half of 2024 and the first of 2025. The results were subjected to analysis of variance and mean test and application of regression models when pertinent. The parameters U (cumulative evaporation depth) and α (diffusivity constant of water on the soil surface during phase 2 of soil drying) of the Ritchie model were adjusted for the amounts of dry mass of corn straw of 0 (P0), 3 (P3), 6 (P6), 9 (P9) and 12 (P12) $t\ ha^{-1}$ in weighing microlysimeters irrigated by conventional spraying. Productivity using micro-sprinkling in the C1 cycle in 2019 decreased with decreasing soil water percentages, with the highest value being $3,472.3\ kg\ ha^{-1}$ and the lowest being $2,237.0\ kg\ ha^{-1}$. Using subsurface drip irrigation, there was no variation in productivity as a function of different levels of soil water stress. On all evaluated dates and as a function of the soil water depletion factor (f) using micro-sprinkling in 2020 (C2), the soil cover index (SCI) showed a linear behavior with soybean crop development, reaching its maximum value of 86.43% at 55 DAS. The total number of seeds per plant and the number of pods per plant using micro-sprinkling in 2020 (C2) progressively reduced as a function of the f factor of 0.1 towards 0.7, at the same time, in this same cycle, the highest average weight of a thousand grains was obtained with f of 0.1. The SPAD index of the soybean crop irrigated by

micro-sprinkling in 2019 (C1) showed significant differences only at 115 and 125 DAS, while using micro-sprinkling in 2020 (C2), with f of 0.3, was the one that presented the highest SPAD index values in the period from 27 to 62 DAS, and an increase in the indices from 62 DAS to 97 DAS for all f values. In the Ritchie model fit, increasing soil corn stover levels in weighing microlysimeter decreased the amount of evaporated water required for the transition from phase 1 to phase 2 to occur. As soil cover levels increased, U values decreased. The Ritchie model parameter α increased with increasing corn stover levels until 10 t ha^{-1} , first in 2025. There was no economic viability when considering only the gains from the sale of a soybean cultivation cycle compared to the fixed and variable production costs of microsprinkler irrigation in the years 2024 and 2025 in Brasília-DF.

Key-words: Irrigation management. *Glycine max* L. SPAD index. Soil moisture.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE FIGURAS	xvi
1. INTRODUÇÃO	20
2. OBJETIVOS	22
2.1 OBJETIVO GERAL	22
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
3. REVISÃO DE LITERATURA	23
3.1 CULTIVO E IRRIGAÇÃO DA SOJA NO BRASIL	23
3.2 ASPECTOS CLIMÁTICOS E ESTRESSE HÍDRICO DA CULTURA DA SOJA	24
3.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DA SOJA.....	25
3.4 DESEMPENHO DA CULTURA DA SOJA.....	25
3.5 SOIL PLANT ANALYSIS DEVELOPMENT (SPAD).....	26
3.6. MODELO DE RITCHIE	27
3.7 ANÁLISE ECONÔMICA	27
4. MATERIAL E MÉTODOS	29
4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....	29
4.2 CULTIVAR DE SOJA.....	29
4.3 CORREÇÃO E ADUBAÇÃO DO SOLO E TRATOS CULTURAIS	29
4.4 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL e tratamentos.....	32
4.4.1 Déficit hídrico durante todo o ciclo da cultura da soja irrigada por microaspersão nos ciclos C1 e C2	32
4.4.2 Déficit hídrico nas fases específicas do ciclo da cultura utilizando irrigação por gotejamento subsuperficial	34
4.5 DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO	34
4.5.1 Irrigação por microaspersão nos ciclos de cultivo C1 (2019) e C2 (2020).....	34
4.5.2 Uniformidade de distribuição da irrigação por microaspersão	35

4.5.3 Irrigação por gotejamento subsuperficial (GS), no ano de 2020	35
4.5.4 Uniformidade de distribuição de água do sistema de irrigação gotejamento subsuperficial e automação da irrigação	36
4.5.5 Irrigação por aspersão para calibração dos parâmetros U e α do Modelo de Ritchie	37
4.5.6 Uniformidade de distribuição da irrigação por aspersão convencional	39
4.6 MONITORAMENTO DA UMIDADE DO SOLO utilizando a microaspersão no C2 e gotejamento subsuperficial em 2020	39
4.7 MANEJO DA IRRIGAÇÃO Na MICROASPERSÃO E no GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL nos ciclos de 2019 e 2020	41
4.8 DESEMPENHO da cultura da soja.....	44
4.9 ÍNDICE SPAD.....	46
4.10 AVALIAÇÃO ECONÔMICA nos ciclos de cultivo com microaspersão, C1 no ano de 2019 e C2 em 2020	48
5.11 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	49
5.1 DADOS CLIMÁTICOS DURANTE O CICLO DE CULTIVO DA SOJA	50
5.3 ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR DA SOJA (IAF)	55
5.4 índice de cobertura do solo (ICS)	58
5.5. FENOLOGIA DA CULTURA DA SOJA.....	62
5.5.1 Fenologia da cultura da soja sob diferentes lâminas de irrigação aplicadas por microaspersão no ano de 2019, ciclo C1.....	62
5.5.2 Fenologia da cultura da soja sob diferentes lâminas de irrigação aplicadas por microaspersão no ano de 2020, ciclo 2 (C2).....	67
5.5.2 Fenologia da cultura da soja sob diferentes lâminas de irrigação aplicadas por gotejamento subsuperficial no ano de 2020.....	75
5.6 ÍNDICE SPAD DA CULTURA DA SOJA.....	78
5.6.1 índice SPAD da cultura da soja irrigada por microaspersão no ano de 2019, ciclo 1 (C1).....	78

5.6.2 índices SPAD da cultura da soja irrigada por microaspersão no ano de 2020, ciclo 2 (C2).....	81
5.9 EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA	89
5.8. AVALIAÇÃO ECONÔMICA.....	90
6. CONCLUSÕES	98
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Produtos fitossanitários utilizados durante os ciclos de produção da soja irrigada por microaspersão e gotejamento subsuperficial.	30
TABELA 2. Resultado da análise química do Latossolo Vermelho utilizado na condução dos experimentos de soja irrigada por microaspersão e gotejamento subsuperficial.	31
TABELA 3. Umidade do solo superior (θ sup) e inferior (θ inf), disponibilidade total de água superior (DTA sup) e inferior (DTA inf) e porcentagem da CTA (% CTA) para cada tratamento mantido durante o ciclo de produção da soja no ciclo C1.	33
TABELA 4. Análise de variância do índice de área foliar (IAF) da cultura da soja sob diferentes lâminas de irrigação aplicadas por microaspersão no ciclo C1, ano de 2019 para diferentes DAS.	56
TABELA 5. Análise de variância do índice de cobertura do solo (ICS) pela cultura da soja sob diferentes lâminas de irrigação (fator de depleção de f de 0,1, 0,2, 0,3, 0,5 e 0,7) aplicadas por microaspersão no ano de 2020.	59
TABELA 6. Análise de variância do peso de mil sementes (PMS), número de nós por planta (NNp), número de vagem por planta (NVp), altura de planta (AP) e produtividade (Prod) da cultura da soja sob diferentes lâminas de irrigação aplicadas por microaspersão no ano de 2019, ciclo C1.	62
TABELA 7. Análise de variância do Comprimento da vagem (CVa), Diâmetro das sementes (DSe), Altura da Planta (AP), Número total de sementes por planta (NTe), Sementes viáveis por planta (SVi), Número de nós por planta (NNos), Semente abortada por planta (SAp), Número de vagens por planta (NVa), Peso seco da haste (PSh), Peso seco da vagem (PsV), Produtividade (Prod), Peso de mil sementes (PMS) e Profundidade de raiz (PRa) da cultura da soja sob diferentes lâminas de irrigação aplicadas por microaspersão no ano de 2020, ciclo C2.	68
TABELA 8. Análise de variância do Peso de mil grãos (PMG), comprimento de raiz (CR), e produtividade (Prod) da cultura da soja sob diferentes períodos de estresse hídrico irrigada por gotejamento subsuperficial no ano de 2020.	75
TABELA 9. Análise de variância do índice SPAD em diferentes DAS da cultura da soja irrigada com lâminas de irrigação suficiente para elevar a umidade do solo à 1,0, 0,8, 0,6, 0,4 e 0,2 da capacidade total de água no solo aplicadas por microaspersão no ano de 2019 (C1).....	79

TABELA 10. Análise de variância do índice SPAD da cultura da soja sob déficit hídrico corresponde ao fator de depleção de água no solo (f) de 0,1, 0,2, 0,3, 0,5 e 0,7, aplicadas por microaspersão no ciclo C2, no ano de 2020 para diferentes dias após a semeadura.	81
TABELA 11. Produtividade, lâmina de água aplicada por microaspersão e eficiência do uso da água (EUA) da cultura da soja cultivada nos anos de 2019 e 2020.	90
TABELA 12. Custo de produção de um hectare de cultivo de soja na região de Brasília – DF para o primeiro e segundo semestre de 2024 e primeiro semestre de 2025 para o sistema de irrigação por microaspersão considerando a produção obtida nos ciclos de cultivo nos anos de 2019 (C1) e 2020 (C2)	91
TABELA 13. Consumo de energia elétrica para o cultivo irrigado de um hectare de soja na região de Brasília – DF irrigada por microaspersão.	94
TABELA 14. Avaliação econômica o cultivo irrigado de um hectare de soja na região de Brasília-DF irrigada por microaspersão.	95

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Croqui da área experimental com distribuição dos tratamentos da microaspersão nos ciclos de cultivo de soja C1 e C2.....	33
FIGURA 2. Croqui da área experimental com distribuição dos tratamentos do gotejamento subsuperficial em todos os ciclos de cultivo da soja, em 2020.....	34
FIGURA 3. Unidade operacional da irrigação por microaspersão (A) e detalhe do microaspersor utilizado no experimento (B) utilizados nos ciclos de cultivo da soja C1 e C2.....	35
FIGURA 4. Tubos gotejadores subsuperficiais (TG), linha de derivação (LD) (A) na profundidade (Z) de 0,3 m (B) e cavalete com válvula solenoide (Ccv).....	36
FIGURA 5. Painel de automação do sistema de irrigação (A) e cabeçal de controle constituído por conjunto moto-bomba, filtro de disco e registros (B).....	37
FIGURA 6. Croqui da disposição dos sistemas de irrigação por aspersão convencional para ajuste do modelo de Ritchie, microaspersão e gotejamento subsuperficial utilizado no cultivo de soja nos anos de 2019 e 2020.	38
FIGURA 7. Curva de retenção de água no solo de Cerrado, nas profundidades de 0-20 cm (A), de 20 - 40 cm (B) e 40 - 60 cm (C), utilizado para o cultivo de soja irrigada por microaspersão, C1 e C2 e gotejamento subsuperficial, em 2020.....	43
FIGURA 8. Imagem utilizada (A) e analisada pelo aplicativo Canopeo (B) da cultura da soja irrigada por microaspersão para determinação do Índice de cobertura do solo (ICS).....	45
FIGURA 9. Visão geral do experimento (A) para determinação do parâmetro U do Modelo de Ritchie com o solo descoberto (B) e para os níveis de palhada equivalente à 3 t ha ⁻¹ (C), 6 t ha ⁻¹ (D), 9 t ha ⁻¹ (E) e 12 t ha ⁻¹ (F).	47
FIGURA 10. Dados climáticos durante o ciclo da cultura da soja submetida a diferentes lâminas de irrigação por microaspersão no período de agosto a dezembro de 2019. A: temperatura máxima, mínima e média. B: Umidade relativa do ar máxima, mínima e média. C: lâmina evapotranspirada e lâmina precipitada.	51
FIGURA 11. Dados climáticos durante o período de condução o ciclo da cultura da soja submetida a diferentes lâminas de irrigação utilizando a microaspersão (C2) e gotejamento subsuperficial (GS) no ano de 2020. A: temperatura máxima, mínima e média. B: Umidade relativa do ar máxima, mínima e média. C: lâmina evapotranspirada e lâmina precipitada. ..	52
FIGURA 12. Comportamento da umidade solo obtida por meio do método padrão de estufa durante o ciclo da cultura da soja submetida a diferentes lâminas de irrigação aplicadas por	

meio de microaspersão no ciclo de cultivo C1, no período de 21 de agosto a 25 de dezembro de 2019.....	53
FIGURA 13. Comportamento da umidade solo obtida por meio do método padrão de estufa durante o ciclo da cultura da soja submetida a diferentes lâminas de irrigação aplicadas por meio de microaspersão no ciclo de cultivo C2, no período de 26 de agosto a 20 de dezembro de 2020.....	55
FIGURA 14. Lâminas brutas de irrigação aplicadas durante o ciclo da cultura da soja submetidas a lâminas de irrigação (T1 a T5) aplicadas por meio de microaspersão no período de 26 de agosto a 20 de dezembro de 2020.....	55
FIGURA 15. Índice de área foliar da cultura da soja sub a diferentes lâminas de irrigação irrigada por microaspersão no ciclo C1, em 2019. Letras minúsculas iguais entre as diferentes lâminas de irrigação não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey dentro de cada DAS.	57
FIGURA 16. Índice de cobertura do solo (ICS) pela cultura da soja sub diferentes lâminas de irrigação aplicadas por microaspersão, no ano de 2020 (C2), em função do fator de depleção de água no solo de 0,1 (T1), 0,2 (T2), 0,3 (T3), 0,5 (T4) e 0,7 (T5). Letras minúsculas iguais entre as diferentes lâminas de irrigação não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey dentro de cada DAS.	61
FIGURA 17. Peso de mil sementes usando a microaspersão no ciclo C1 para as lâminas de irrigação suficiente para elevar a umidade do solo à 1,0 (T1), 0,8 (T2), 0,6 (T3), 0,4 (T4) e 0,2 (T5) da capacidade total de água no solo (CTA). Letras minúsculas iguais entre os tratamentos não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.	64
FIGURA 18. Valores do número de nós por planta (NNos) usando a microaspersão no ciclo C1 para as lâminas de irrigação suficiente para elevar a umidade do solo à 1,0 (T1), 0,8 (T2), 0,6 (T3), 0,4 (T4) e 0,2 (T5) da capacidade total de água no solo (CTA).	64
FIGURA 19. Número de vagem por planta usando a microaspersão no ciclo C1 para as lâminas de irrigação suficiente para elevar a umidade do solo à 1,0 (T1), 0,8 (T2), 0,6 (T3), 0,4 (T4) e 0,2 (T5) da capacidade total de água no solo (CTA).	65
FIGURA 20. Altura das plantas de soja usando a microaspersão no ciclo C1 para as lâminas de irrigação suficiente para elevar a umidade do solo à 1,0 (T1), 0,8 (T2), 0,6 (T3), 0,4 (T4) e 0,2 (T5) da capacidade total de água no solo (CTA). Letras minúsculas iguais entre os tratamentos não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.	66

FIGURA 21. Produtividade da soja usando a microaspersão no ciclo C1 para as lâminas de irrigação suficiente para elevar a umidade do solo à 1,0 (T1), 0,8 (T2), 0,6 (T3), 0,4 (T4) e 0,2 (T5) da capacidade total de água no solo (CTA). Letras minúsculas iguais entre os tratamentos não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. 67

FIGURA 22. Comprimento da vagem (CVa), Diâmetro das sementes (DSe) e Semente abortada por planta (SAp) da cultura da soja irrigada por microaspersão no ano de 2020, ciclo 2 (C2) em função do fator de depleção de água no solo de 0,1 (T1), 0,2 (T2), 0,3 (T3), 0,5 (T4) e 0,7 (T5). 70

FIGURA 23. Valores de Total de sementes por planta (TSe); Sementes viáveis por planta (SVi) e Número de vagens por planta (NVa), com microaspersão, ciclo C2, em função do fator de depleção de água no solo de 0,1 (T1), 0,2 (T2), 0,3 (T3), 0,5 (T4) e 0,7 (T5). Letras minúsculas iguais entre os tratamentos não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. 72

FIGURA 24. Valores do Número de nós por planta (NNos) e Profundidade das raízes (cm) (Pra), com microaspersão, ciclo C2, em função do fator de depleção de água no solo de 0,1 (T1), 0,2 (T2), 0,3 (T3), 0,5 (T4) e 0,7 (T5). 73

FIGURA 25. Valores de Altura das plantas (cm) (AP) e Peso de mil grãos de soja (g) (PMG), com microaspersão, ciclo C2, em função do fator de depleção de água no solo de 0,1 (T1), 0,2 (T2), 0,3 (T3), 0,5 (T4) e 0,7 (T5). Letras minúsculas iguais entre os tratamentos não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. 74

FIGURA 26. Valores de Produtividade ($t\ ha^{-1}$), com microaspersão, ciclo C2, em função do fator de depleção de água no solo de 0,1 (T1), 0,2 (T2), 0,3 (T3), 0,5 (T4) e 0,7 (T5). 75

FIGURA 27. Peso de mil grãos usando o gotejamento subsuperficial para diferentes períodos de estresse hídrico no solo, sendo GS1 (7 dias sem irrigação), GS2 (14 dias sem irrigação), GS3 (21 dias sem irrigação), GS4 (30 dias sem irrigação) e GS5 (sem irrigação durante todo o ciclo da soja), respectivamente identificados como T1, T2, T3, T4 e T5. Letras minúsculas iguais entre os tratamentos não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. 77

FIGURA 28. Comprimento de raiz (CR) usando o gotejamento subsuperficial para diferentes períodos de estresse hídrico no solo, sendo GS1 (7 dias sem irrigação), GS2 (14 dias sem irrigação), GS3 (21 dias sem irrigação), GS4 (30 dias sem irrigação) e GS5 (sem irrigação durante todo o ciclo da soja), respectivamente identificados como T1, T2, T3, T4 e T5. 77

FIGURA 29. Produtividade da soja usando o gotejamento subsuperficial para diferentes períodos de estresse hídrico no solo, sendo GS1 (T1) (7 dias sem irrigação), GS2 (T2) (14 dias sem irrigação, GS3 (T3) (21 dias sem irrigação), GS4 (T4) (30 dias sem irrigação) e GS5 (T5) (sem irrigação durante todo o ciclo da soja), respectivamente identificados como T1, T2, T3, T4 e T5.....	78
FIGURA 30. Índice SPAD da cultura da soja em diferentes DAS irrigada com lâminas de irrigação suficiente para elevar a umidade do solo à 1,0, 0,8, 0,6, 0,4 e 0,2 da capacidade total de água no solo, aplicadas por microaspersão no ano de 2019 (C1). Letras minúsculas iguais entre as diferentes lâminas de irrigação não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey dentro de cada DAS.	81
FIGURA 31. Índice SPAD da cultura da soja sob déficit hídrico corresponde ao fator de depleção de água no solo (f) de 0,1, 0,2, 0,3, 0,5 e 0,7, aplicadas por microaspersão no ciclo C2, no ano de 2020. Letras minúsculas iguais entre as diferentes lâminas de irrigação não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey dentro de cada DAS.....	84
FIGURA 32. Evaporação direta do solo em dias após a última irrigação e evaporação do tanque classe A (ECA) para os níveis de palhada de milho de 0 (P0), 3 (P3), 6 (P6), 9 (P9) e 12 (P12) t ha ⁻¹	85
FIGURA 33. Valores acumulados da evaporação do solo com diferentes níveis de palhada 0 (P0), 3 (P3), 5 (P5), 9 (P9) e 12 (P12) t ha ⁻¹ em relação a evaporação do tanque Classe A (Ev/ECA) em dias após a última irrigação.....	86
FIGURA 34. Curvas representativas para diferentes níveis de palhada no solo da razão entre a evaporação acumulada da água no solo (Ea) e a evaporação acumulada do taque Classe A (ECA), eixo y a esquerda, da razão entre a diferença do valor da derivada de primeira ordem no dia i pelo seu valor no dia i +1 e a derivada no ponto 2, eixo y a direita, e da evaporação acumulada, eixo y mais à direita, para os níveis de palhada de milho de 0, 3, 6, 9 e 12 t ha ⁻¹ (A, B, C, D e E, respectivamente). Destaca-se o final da fase 1 de evaporação e o valor do parâmetro U. Parâmetro U de evaporação de água no solo em função dos níveis de palhada (F).	87
FIGURA 35. Parâmetro Ea ₂ de evaporação de água no solo em função dos níveis de palhada no interior de lisímetros irrigado por aspersão convencional.	88
FIGURA 36. Valores observados e estimados do parâmetro α do modelo de Ritchie em função do nível de palhada no solo;.....	89

1. INTRODUÇÃO

O bioma Cerrado está localizado na porção central do Brasil abrangendo uma área de 204 milhões de hectares, sendo uma área de importância econômica, ecológica e agrícola brasileira (SILVA et al., 2015). Esse bioma se destaca na agricultura brasileira pela produção grãos. Segundo Gazzoni & Dall’Agnol (2018), 61% da soja produzida no Brasil é cultivada na região de Cerrados, além disso, a produtividade nessa região apresenta melhores resultados quando comparada às produtividades observadas na região Sul do Brasil.

No Cerrado, apesar de as chuvas serem adequadas para a prática da agricultura em condições de sequeiro, ocorre períodos de estiagem dentro do período chuvoso, que podem acarretar perdas na produtividade da soja (FLUMIGNAN et al., 2015). De acordo com CONAB (2019) a região centro-oeste teve uma redução de 5,2% na produção de soja na safra de 2018/2019 em relação à safra passada em decorrência da reduzida incidência de chuvas.

Devido às perdas na produção, tem se tornado crescente o interesse por parte dos produtores pela utilização da irrigação suplementar nos períodos em que as precipitações não são suficientes para atender a demanda hídrica da cultura da soja (FLUMIGNAN et al., 2015), apresentando melhores resultados quando empregada no período da semeadura à emergência e no enchimento dos grãos (FARIAS et al., 2001).

Assim, é necessário o aprimoramento de técnicas de manejo da irrigação no sentido de maximizar e otimizar o uso dos recursos hídricos disponíveis. A manutenção do rendimento das culturas sob condições adversas é um dos principais desafios da agricultura atual frente às mudanças climáticas. Portanto, estratégias que levem ao consumo apenas dos insumos necessários ao melhor desenvolvimento das culturas são fundamentais para tornar a agricultura uma prática lucrativa e autossustentável. Neste sentido, deve-se gerar conhecimentos que conduzam a elevação da eficiência no uso da água, imprescindível em regiões como o Cerrado, no intuito de aprimorar o manejo da irrigação, elevando o rendimento agrônomico e a lucratividade das culturas agrícolas.

Para otimizar o uso dos recursos hídricos na produção agrícola, uma das alternativas do manejo de irrigação é determinar a evapotranspiração atual da cultura (ET_c) (MAJIDI et al., 2015). Existe na literatura diversas metodologias para se calcular a ET_c (ALVES et al., 2017; SHRIVASTAVA & SHARMA, 2018; YANG et al., 2018), sendo a mais comumente utilizada àquela em que a ET_c é estimada em função de uma evapotranspiração de referência (ET_o) (ALLEN et al., 1998), de um coeficiente de cultura

(Kc) (SKAGGS & IRMAK, 2012) e de um coeficiente de ajuste em função do teor de água atual em relação à capacidade total de água no solo (Ks) (ALLEN et al., 1998).

Nesses casos, a determinação correta da ETC depende da acurácia dos valores de Kc, que, de acordo com Irmak et al. (2013), são assumidos de maneira empírica em função das características do dossel da cultura que distinguem da superfície da cultura de referência (grama). Com isso, a reposição da lâmina de irrigação pode não ser suficiente para atender a demanda de água pela cultura da soja. Gava et al. (2016) constaram que o déficit severo de água no solo reduziu a altura das plantas, o número de vagens por planta, e, conseqüentemente, a produtividade da cultura da soja.

Para melhorar a precisão do uso dos coeficientes empíricos, foram desenvolvidos modelos para estimar a evapotranspiração da cultura (PEREZ et al., 1999; ALVES et al., 2017), sendo que estes consideram a cobertura incompleta do solo (RITCHIE, 1972; BRISSON et al., 1998; RAES et al., 2009), quando a cultura apresenta baixo índice de área foliar (IAF), além de distinguir a evaporação direta do solo (Es) e a transpiração da cultura (Ep) (SEDIYAMA, 1996).

Um dos modelos desenvolvidos utilizando esses fundamentos foi de Ritchie (1972). Segundo Soares & Almeida (2001), esse modelo pode ser aplicado para estimar a Es (evaporação de água do solo) e Ep (transpiração das plantas) para diferentes lâminas de irrigação e texturas de solo. Além disso, as equações empregadas são semiempíricas, relacionadas com mensurações realizadas em campo (RITCHIE, 1972). Devido a sua praticidade e simplicidade, o modelo de Ritchie tem sido empregado para determinar a demanda hídrica de diversas culturas (KAYA et al., 2017; PADIYEDATH et al., 2017; BASSO & RITCHIE, 2018; FARZANPOUR et al., 2019).

Para um melhor rendimento das culturas, além de determinar de maneira correta a demanda evapotranspirométrica, se faz necessário estabelecer o manejo da irrigação que possibilite maior aproveitamento da água pelas plantas. Nesse sentido, vários modelos foram desenvolvidos para auxiliar tanto pesquisadores como produtores rurais na definição do melhor momento para realizar a irrigação (BASTOS et al., 2000; RODRIGUES & MOREIRA, 2015).

Apesar da a prática de irrigação proporcionar elevação das produtividades das culturas, existe a necessidade, por parte do irrigante, de realizar investimentos para aquisição de equipamentos de irrigação e de captação da água, custos da energia elétrica, dentre outros, com isso, o manejo da irrigação deve ser viável economicamente (ALVES JUNIOR et al., 2017).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho da cultura da soja irrigada por microaspersão e gotejamento subsuperficial para diferentes níveis de umidade no solo em condições endofoclimáticas do Cerrado brasileiro e estimar os parâmetros U e α do modelo de Ritchie.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estimar os parâmetros U e α do modelo de Ritchie para diferentes níveis de cobertura do solo de palha do milho irrigada por aspersão convencional

Avaliar os parâmetros morfológicos da cultura da soja para diferentes níveis de umidade do solo irrigado por microaspersão e gotejamento subsuperficial.

Avaliar a eficiência do uso da água (EUA) pela cultura da soja irrigada por microaspersão e gotejamento subsuperficial.

Avaliar a viabilidade econômica da cultura da soja submetida a diferentes níveis de umidade do solo utilizando irrigação por microaspersão.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 CULTIVO E IRRIGAÇÃO DA SOJA NO BRASIL

A produção agrícola mundial ocupa uma área de 4,8 bilhões de hectares, sendo que, aproximadamente, 354 milhões de hectares são destinados aos cultivos irrigados, o que corresponde a 7,4% da área total destinada à produção mundial de alimentos. As maiores áreas irrigadas estão implantadas na Índia, 75,5 milhões de hectares, China, 74,5 milhões de hectares e Estados Unidos, 26,9 milhões de hectares irrigados (FAO, 2024).

O Brasil destina uma área, aos cultivos irrigados, de 9,2 milhões de hectares (FAO, 2024), correspondendo a 8,8% das áreas destinadas aos plantios (IBGE, 2017). Segundo a ANA (2017) a área apta ao uso de irrigação no país é de, aproximadamente, 76 milhões de hectares e as maiores áreas cultivadas utilizando algum sistema de irrigação são destinadas para os cultivos de arroz, cana-de-açúcar, feijão, milho e soja.

A soja (*Glycine max*, (L.) Merrill) é uma planta originária da China, sendo cultivada desde 2207 antes de Cristo (a.C.) (BONATO & BONATO, 1987). No Brasil, foi introduzida no final do século XIX, porém seu cultivo comercial iniciou-se na década de 70, na região sul do país, devido à limitada produção internacional (GAZZONI & DALL'ALGNOL, 2018). Dentre os fatores que levaram a expansão no cultivo de soja destaca-se o aumento do consumo de proteína animal, sendo a soja um dos principais ingredientes na formulação de rações, a substituição do uso de gorduras animais por óleos vegetais, o desenvolvimento de novas matrizes energéticas, com a utilização de biocombustíveis, além do surgimento de variedades adaptadas às diversas condições de cultivo brasileiras (BALBINOT JUNIOR et al., 2017).

O cultivo de soja no Brasil ocupa área de 46,03 milhões de hectares (CONAB, 2023), sendo o maior produtor mundial, com produção aproximada de 121 milhões de toneladas de soja por ano (FAO, 2024). As áreas de cultivo de soja no país estão concentradas, principalmente, nos Estados de Mato Grosso, 11,98 milhões de hectares, Rio Grande do Sul, 6,64 milhões de hectares, Paraná, 5,83 milhões de hectares, e Goiás, 4,43 milhões de hectares, sendo que a região centro-oeste representa 46,1% da produção brasileira (IBGE, 2024).

Apesar da grande área cultivada com soja, apenas 162 mil hectares, ou 0,5% da área cultivada é irrigada (ANA, 2019), que segundo Guimarães & Landau (2014), o pivô central é o sistema mais utilizado. Embora a área irrigada seja relativamente pequena, o Brasil tem como meta ampliar a área irrigada em 5,0 milhões de hectares nos próximos

dez anos (CHRISTOFIDIS, 2017), sendo que, a área cultivada com soja irrigada por ser beneficiada com a ampliação da área irrigada.

A irrigação por meio do pivô central consiste em irrigar áreas em formatos circulares, por esse motivo, quanto maior for a área irrigada, menor será o investimento por hectare irrigado (CABREIRA et al., 2024). A limitação das áreas irrigadas por cada equipamento está relacionada com a topografia e a disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica na qual será instalada o pivô central. Neste sentido a irrigação localizada pode ser uma alternativa ao pivô central.

3.2 ASPECTOS CLIMÁTICOS E ESTRESSE HÍDRICO DA CULTURA DA SOJA

A cultura da soja se adapta melhor em regiões onde as temperaturas variam de 20 °C a 30 °C sendo que a temperatura ideal para o seu desenvolvimento está em torno de 30 °C (FARIAS et al., 2007). De acordo com Wiebbcke et al. (2012) temperaturas acima dos 35 °C podem prejudicar a polinização das flores devido a esterilidade do grão de pólen. Segundo Verón et al. (2015) o rendimento da soja pode diminuir em 10% para cada 1 °C de aquecimento. Por outro lado, temperaturas do solo inferiores a 20 °C prejudicam a germinação e a emergência da cultura e temperaturas menores que 10 °C paralisam o crescimento das plantas (EMBRAPA, 2014).

Em relação ao fotoperíodo, a soja é uma planta sensível à disponibilidade de horas de luz, sendo que essa sensibilidade é uma característica variável entre as cultivares de soja (FARIAS et al., 2007). Conforme relata Rodrigues et al. (2001), a soja é uma planta de dia curto, com isso, a instalação da lavoura em períodos com dias longos, o desenvolvimento das estruturas florais é prejudicado. Contudo, segundo esse autor, a resposta ao fotoperíodo é qualitativa e não absoluta, ou seja, o florescimento das plantas ocorrerá de qualquer modo. De acordo com Meotti et al. (2012) a época de semeadura da soja ocasiona variações entre 74% e 79% na produtividade da cultura.

Outro fator que influencia na fisiologia da planta, e por consequência, na produtividade é a disponibilidade hídrica no solo. De acordo com Farias et al. (2007) a planta de soja é composta por 90% de água, além ser o principal componente, a água atua em todos os processos fisiológicos e bioquímicos da planta. Apesar da planta de soja apresentar mecanismos de resistência ao estresse hídrico (MUTAVA et al., 2015), a falta de água pode ser crítica em determinada fase da cultura, que segundo Gava et al. (2016) a limitação severa de água, na fase vegetativa, diminui o tamanho das plantas. Para Gava et al. (2015) o estresse hídrico afeta o crescimento da planta, o número de vagens por

planta, número de grãos por planta, o peso de 100 grãos, e conseqüentemente, a produtividade.

3.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DA SOJA

A determinação correta da evapotranspiração é fundamental para o manejo adequado da água na cultura da soja (ANAPALLI et al., 2018), sendo também útil para os cultivos que não fazem o uso da irrigação, pois o conhecimento da demanda evapotranspirométrica da cultura é uma informação que possibilita o manejo adequado da irrigação para o melhor aproveitamento do suprimento hídrico via pluviosidade (FARIAS et al., 2007). Para isso, diversos trabalhos foram realizados com o objetivo de determinar a evapotranspiração real da soja cultivada em diferentes tipos clima e solo (SOUZA et al., 2016; KUKAL et al., 2017; ANAPALLI et al., 2018; BAEUMBER et al., 2019).

Além dos fatores climáticos utilizados para a determinação da evapotranspiração da cultura da soja, o coeficiente da cultura (K_c) também se faz necessário para o cálculo da demanda hídrica da cultura. Segundo Oliveira et al. (2016) os valores de K_c são determinados para cada cultura e variáveis de acordo com ciclo fenológico, assumindo diferentes valores em função do seu desenvolvimento. No início do ciclo da cultura, os valores de K_c são baixos, sendo crescentes nas fases de crescimento vegetativo e floração, estabilizando e alcançando o seu valor máximo na frutificação e decrescendo no final do ciclo da cultura (ALLEN et al., 1998).

Os valores de K_c estabelecidos pela FAO para a cultura da soja são de 0,35, 0,75, 1,15 e 0,75 nas fases inicial, desenvolvimento, frutificação e maturação, respectivamente (ALLEN et al., 1998). Bariviera et al. (2020), com experimento na região de Tangará da Serra – MT, observou valores de K_c para a cultura da soja de 0,47 no início do ciclo, 1,15 na fase intermediária e 0,89 no final do ciclo da cultura.

3.4 DESEMPENHO DA CULTURA DA SOJA

A planta de soja apresenta mecanismos que minimizam efeitos adversos no seu desempenho quando submetida a períodos de estresse hídrico (MUTAVA et al., 2015). Contudo, ocorrem dois períodos durante o ciclo da cultura em que a restrição hídrica afeta diretamente o desenvolvimento das plantas, e por conseqüência, o rendimento final da cultura. Segundo Farias et al (2001) o primeiro momento em que a soja apresenta uma maior sensibilidade à baixa umidade no solo é o período da sementeira até emergência

das plantas, e o segundo período crítico ocorre desde o florescimento estendendo até o enchimento dos grãos, sendo que nessa última fase o déficit hídrico apresenta maiores limitações no desempenho da cultura (FLUMIGNAN et al., 2015).

De acordo com Gava et al (2016) a produtividade da soja é prejudicada pela restrição de água no solo nos períodos de formação das vargens e no enchimento do grão. Essa limitação na produção está relacionada aos mecanismos de defesa da planta que provocam um maior número de vargens abortadas, já que a planta direciona o fluxo de água para as vargens que apresentam um maior desenvolvimento (CASAGRANDE et al., 2001).

Além de afetar a produtividade da soja, o estresse hídrico prejudica o desenvolvimento das plantas. Gava et al (2016) constatou que as plantas apresentam uma menor altura quando submetidas a restrição hídrica no início do desenvolvimento vegetativo das plantas. Gava et al (2018) observou que o déficit hídrico não prejudica somente a altura das plantas, mas também a produção de biomassa e o peso de 100 grãos. Já Mertz-Henning et al (2018) analisou que a restrição hídrica afeta o número de vargens por planta, o número de sementes por planta, a massa seca da semente e o conteúdo de proteína e óleo na semente.

3.5 SOIL PLANT ANALYSIS DEVELOPMENT (SPAD)

O soil plant analysis development (SPAD) chlorophyll meter é um equipamento que faz leituras do teor de clorofila presente na folha da cultura, servindo como um indicador da saúde da cultura (NEVES et al., 2005). Em geral, as plantas saudáveis possuem maior quantidade de clorofila do que plantas doentes. Segundo Giletson al. (2002) o equipamento do SPAD funciona avaliando, quantitativamente, a intensidade do verde da folha, medindo as transmissões de luz a 650 nm, onde ocorre absorção de luz pela molécula de clorofila e a 940 nm, onde não ocorre absorção. Com estes dois valores, o equipamento calcula um número ou índice SPAD que, normalmente, é altamente correlacionado com o teor de clorofila da folha (MARKWELL et al., 1995; GUIMARÃES et al., 1999).

A clorofila é um pigmento fotorreceptor e tem uma grande importância para as plantas. ela faz com que as plantas consigam absorver os comprimentos de ondas emitidos pelo sol, e iniciar o processo de fotossíntese. A fotossíntese é o processo em que a planta realiza para realização dos seus processos bioquímicos, isso a planta realiza durante todo seu desenvolvimento até a senescência (NEVES et al., 2005).

3.6. MODELO DE RITCHIE

O modelo de Ritchie (Ritchie, 1972) permite calcular separadamente a transpiração da cultura (E_p) e a evaporação direta de água no solo (E_s), tendo como premissa as duas fases iniciais da evaporação da água no solo. Segundo Philip (1957) e Idso et al. (1974) citados por Rodrigues et al. (2005), o processo de secagem do solo pode ser dividido em três fases: a primeira fase (fase 1) é o processo de evaporação relativamente elevada e controlada basicamente pela demanda atmosférica, pela profundidade do solo e suas propriedades hidráulicas. A segunda fase (fase 2) ocorre a partir do momento que a água no solo não é capaz de ser transmitida à superfície do solo a uma velocidade suficiente para atender a demanda atmosférica. É, nessa fase, que tem o início do processo de secagem da superfície do solo e, conseqüentemente, a taxa de evaporação do solo diminui, sendo que o fluxo de água no solo ocorre tanto na fase líquida quanto na de vapor. Segundo Pereira et al. (1997) nessa fase, a evaporação ocorre no interior do solo, sendo influenciada pelas condições meteorológicas e pela condutividade hidráulica do solo. Por fim, a terceira fase (fase 3) pode ser caracterizada pela taxa de evaporação do solo reduzida e constante.

O modelo matemático proposto por Ritchie (1972) para descrever o processo de evaporação de água no solo (E_s) considera a primeira e segunda fase de secagem do solo. A determinação da fase do processo de evaporação de água no solo é estimada pelos parâmetros U e α . A duração da fase 1 é determinada pela lâmina evaporação acumulada, parâmetro U , em mm, sendo que após essa lâmina, o solo inicia a fase 2 de evaporação. A fase 2 do processo de evaporação é representado pelo parâmetro α , que é a constante de difusividade da água na superfície do solo durante a fase 2 de secagem (PEREIRA et al., 1997).

3.7 ANÁLISE ECONÔMICA

A irrigação é uma prática agrícola que proporciona elevadas produtividades, um melhor aproveitamento do uso da terra, sendo possível a obtenção de até três safras em um mesmo ano agrícola (FLUMIGNAN et al., 2015). Ainda que a prática da irrigação propicie esses benefícios, existe a necessidade de realizar investimentos para aquisição do equipamento de irrigação e os custos da energia elétrica e da captação de água, sendo que o manejo da irrigação deve ser não apenas para elevar a produtividade da cultura,

mas também ser viável economicamente (ALVES JUNIOR et al., 2017; RAPASSI et al., 2017).

Na cultura da soja, a irrigação vem sendo utilizada de modo a complementar a demanda hídrica nos períodos em que as chuvas não são satisfatórias (FLUMIGNAN et al., 2015). Realizando a irrigação complementar utilizando um pivô-central na cultura da soja, Richetti et al. (2015) observaram que a irrigação corresponde a 21,1% do custo do total da lavoura de soja, sendo necessárias 6,14 sc ha⁻¹ para se arcar com o custo da irrigação. Ruviaro et al. (2011) observaram que a soja irrigada propiciou uma receita líquida de 12,6 sc ha⁻¹, sendo que o uso da irrigação não só proporcionou o aumento da produtividade, mas também foi viável economicamente. Já Basso (2019) submetendo a cultura da soja a diferentes intervalos de umidade no solo constatou que a aplicação de maiores lâminas de irrigação acarretou maiores retornos econômico, além disso, a cada 10 mm de água não aplicados na cultura da soja a lucratividade diminuiu em R\$ 115,80 por hectare.

O custo de produção das culturas pode ser obtido por diversas metodologias (ALVES JÚNIOR et al., 2017; SANTOS et al., 2017; ZANATTA et al., 2018), sendo um fator que auxilia na tomada de decisão na gestão da propriedade rural. Dentre as metodologias descritas, a proposta por Matsunaga et al. (1876) foi utilizada por diversos autores (ALVES JÚNIOR et al., 2017; DANIEL et al., 2019; ROBERTO et al., 2019) na determinação da viabilidade econômica de diversas culturas. Nesse modelo, os custos de produção são divididos em dois grupos distintos.

O primeiro, custo operacional efetivo (COE), que engloba os custos diretos de produção, tal qual o preparo do solo, sementes, fertilizantes, agrotóxicos, além dos custos com máquinas e combustível. No segundo conjunto de despesas estão reunidos os custos indiretos (CI), que são os desembolsos com o custo fixo e o custo indireto para obter-se a produção, como: juros, custo da terra, impostos e depreciações. Com isso, o custo total de produção (CT) é a somatória do COE e CI.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O trabalho foi desenvolvido no campo experimental da Embrapa Cerrados, localizado nas coordenadas geográficas de 15°35'56" S de latitude, 47°42'26" W de longitude e 980 m de altitude. O clima da região, conforme a classificação de Köppen, é do tipo Aw, caracterizado por duas estações bem definidas, uma estação quente e chuvosa, que ocorre de outubro a abril, e outra fria e seca de maio a setembro (ALVARES, 2014). O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho e apresenta uma declividade de aproximadamente 3% na área do experimento.

As informações de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar global, necessárias para a realização desse estudo, foram obtidas de uma estação meteorológica localizada a 750 m do local do experimento.

O ciclo C1 foi realizado no período de no período de 21 de agosto a 25 de dezembro de 2019 e o C2 de 26 de agosto a 20 de dezembro de 2020.

4.2 CULTIVAR DE SOJA

A cultivar de soja utilizada em todos os ciclos de produção da soja foi a variedade BRS 7581 RR, semeada com o espaçamento de 0,5 m entre linhas, e com 14 plantas por metro linear, correspondendo a uma densidade de 280.000 plantas por hectare. O plantio foi realizado por meio de uma semeadora mecanizada com cinco linhas de plantio tracionada por um trator com 100 CV.

4.3 CORREÇÃO E ADUBAÇÃO DO SOLO E TRATOS CULTURAIS

A correção do solo com calagem foi realizada apenas em 2019, aos 60 dias antes da semeadura do ciclo (C1) e a definição da adubação de plantio e de cobertura foi realizada a partir da análise da fertilidade do solo utilizando as recomendações de Embrapa (2012). Para isso, foram coletadas amostras de solo, em forma de zig-zag, nas profundidades de 0 – 0,2 m e 0,2 – 0,4 m em dez pontos distintos para área que foi utilizada a irrigação por microaspersão e outros dez pontos foram selecionados para a coleta, nas mesmas profundidades, para a área na qual foi irrigada por gotejamento subsuperficial. Com isso, foram formadas duas amostras compostas para cada

profundidade e sistema de irrigação, sendo encaminhadas ao Laboratório de Química de Solo da Embrapa Cerrados e analisadas conforme Embrapa (1997).

A partir da análise de solo da área (Tabela 1), foram aplicados, a lanço, 1.500 kg ha⁻¹ calcário dolomítico com poder relativo de neutralização total (PRNT) de 100%, 47% de CaO e 7% de MgO, para elevar a saturação de bases no solo para 60%, de acordo com a metodologia de saturação por bases descrita por Souza et al. (2004). O calcário foi incorporado com gradagem 60 dias antes da semeadura (DAS).

Também, utilizando os resultados da análise de solo, foi determinada a adubação de plantio, realizada na linha de plantio, de maneira mecanizada, utilizando a dose de 700 kg ha⁻¹ do adubo químico na formulação de 5% de N, 25% de P₂O₅, 15% de K₂O, 5 % de Ca, 3% de S, 0,09% de B, 0,06% de Mn e 0,04% de Zn. A adubação de cobertura foi realizada por meio de adubação foliar, na qual foi disponibilizado para a cultura o cobalto, 3 g ha⁻¹, e molibdênio, 12 g ha⁻¹, quando a cultura apresentou três folíolos desenvolvidos (V3) (Embrapa, 2014).

O controle de pragas e doenças foram realizados conforme a necessidade da cultura e recomendações de Embrapa (2014). Os produtos fitossanitários utilizados durante os ciclos da soja estão apresentados na Tabela 2.

TABELA 1. Produtos fitossanitários utilizados durante os ciclos de produção da soja irrigada por microaspersão e gotejamento subsuperficial.

Classe	Ingrediente ativo	Dose	Número de aplicações por ciclo
Inseticida	Tiometoxam + lamba-cialotrina	0,25 L ha ⁻¹	2
Fungicida	Impirfluxam + protioconazol	0,4 L ha ⁻¹	1
Herbicida	Glifosato	1,5 kg ha ⁻¹	2
Fungicida	Piraclostrobina + metconazol	0,6 L ha ⁻¹	1
Herbicida	Cletodim	0,5 L ha ⁻¹	1
Fungicida	Piraclostrobina + epoxiconazol	0,5 L ha ⁻¹	1
Inseticida	Acefato	1 kg ha ⁻¹	1

TABELA 2. Resultado da análise química do Latossolo Vermelho utilizado na condução dos experimentos de soja irrigada por microaspersão e gotejamento subsuperficial.

Sistema de irrigação	Profundidade (ciclos) (m)	Al	Ca	Cu	H + Al	K	M.O.	Mg	Mn	pH	pH em CaCl ₂	P	Zn	CTC total	CTC efetiva	SB
Microaspersão	0 – 0,2 (C1)	0,050	2,355	0,400	5,266	39,000	2,671	0,917	10,100	5,520	5,090	11,550	0,300	8,637	3,421	3,371
	0 – 0,2 (C2)	0,020	2,520	0,300	4,190	46,000	2,651	1,000	9,000	5,760	5,250	12,270	0,000	7,828	3,358	3,638
	0,2 – 0,4 (C1)	0,046	2,360	0,400	5,570	45,000	2,591	0,833	8,900	5,530	5,050	9,842	0,000	8,873	3,354	3,308
	0,2 – 0,4 (C2)	0,022	2,160	0,300	4,612	52,000	2,516	0,833	7,700	5,610	5,120	8,280	0,000	7,738	3,148	3,126
Gotejamento subsuperficial	0 – 0,2	0,020	2,490	0,300	4,527	64,000	2,807	1,083	8,500	5,750	5,280	7,758	0,000	8,264	3,757	3,737
	0,2 – 0,4	0,044	1,950	0,600	4,917	57,000	2,310	0,833	7,000	5,530	5,070	3,969	0,000	7,846	2,973	2,929

Al: alumínio trocável (me 100⁻¹ cc); Ca: cálcio (me 100⁻¹ cc); Cu: cobre (mg L⁻¹); H+Al: acidez titulável (me 100⁻¹cc); K: potássio (mg L⁻¹); M. O: matéria orgânica (%); Mg: magnésio (me 100⁻¹); Mn: manganês (mg L⁻¹); P: fósforo (mg L⁻¹); Zn: zinco (mg L⁻¹); pH: pH em água; CTC total: Ca+Mg+(K/391)+(H+Al); CTC efetiva: Ca+Mg+(K/391)+Al; e SB: soma de bases (Ca+Mg+(K/391)).

4.4 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

4.4.1 Déficit hídrico durante todo o ciclo da cultura da soja irrigada por microaspersão nos ciclos C1 e C2

No ciclo conduzido no ano de 2019, C1, foram utilizados cinco tratamentos, cada um constituído por quatro repetições, disposto em blocos casualizados (B1 a B4, Figura 1). Os tratamentos corresponderam à lâmina de irrigação suficiente para manter a umidade do solo nos seguintes intervalos 100 – 80% da capacidade total de água no solo (CTA), 80 – 60% da CTA, 60 – 40%, 40 – 20% da CTA e de 20 – 0% da CTA, identificados como M1C1, M2C1, M3C1, M4C1 e M5C1, respectivamente.

No ciclo C1, a capacidade total de água no solo (CTA) foi estabelecida conforme a Equação 1, indicada por Martins et al. (2011), e em seguida, foram realizados ajustes da CTA para cada tratamento a partir da multiplicação dos coeficientes 1,0, 0,8, 0,6, 0,4 e 0,2 para os tratamentos M1C1, M2C1, M3C1, M4C1 e M5C1, respectivamente. Os intervalos em que a umidade do solo foi mantida para cada um dos tratamentos propostos estão apresentados na Tabela 3.

$$CTA = \frac{(\theta_{CC} - \theta_{PMP})}{10} \times D_s \times Z \quad (1)$$

em que:

CTA: capacidade total de água no solo, mm;

θ_{CC} : umidade do solo na capacidade de campo em base peso, %;

θ_{PMP} : umidade do solo no ponto de murcha permanente em base peso, %;

D_s : densidade do solo, g cm⁻³ e

Z: profundidade efetiva do sistema radicular da cultura, cm.

TABELA 3. Umidade do solo superior (θ sup) e inferior (θ inf), disponibilidade total de água superior (DTA sup) e inferior (DTA inf) e porcentagem da CTA (% CTA) para cada tratamento mantido durante o ciclo de produção da soja no ciclo C1.

Tratamento	θ sup (%)	θ inf (%)	DTA sup (mm cm ⁻¹)	DTA inf (mm cm ⁻¹)	% CTA (%)
M1C1	33,81	31,02	1,53	1,21	100 – 80
M2C1	31,02	28,29	1,21	0,92	80 – 60
M3C1	28,29	25,47	0,92	0,61	60 – 40
M4C1	25,47	22,75	0,61	0,28	40 – 20
M5C1	22,75	19,93	0,28	0,00	20 – 0

No segundo ciclo, C2, conduzido no ano de 2020, utilizando a microaspersão, foram utilizados cinco tratamentos, cada um, constituído por quatro repetições, disposto em blocos casualizados (B1 a B4, Figura 1). Os tratamentos corresponderam ao fator de depleção de água no solo (f), sendo que o tratamento M1C2 representou um f de 0,1, M2C2 de 0,2, M3C2 de 0,3, M4C2 de 0,5 e M5C2 de 0,7.

Na irrigação por microaspersão, os ciclos de cultivos, C1 e C2, cada parcela experimental possui 2,0 m de largura, composta por quatro linhas de plantas, e 4,0 m de comprimento compostas (Figura 1).

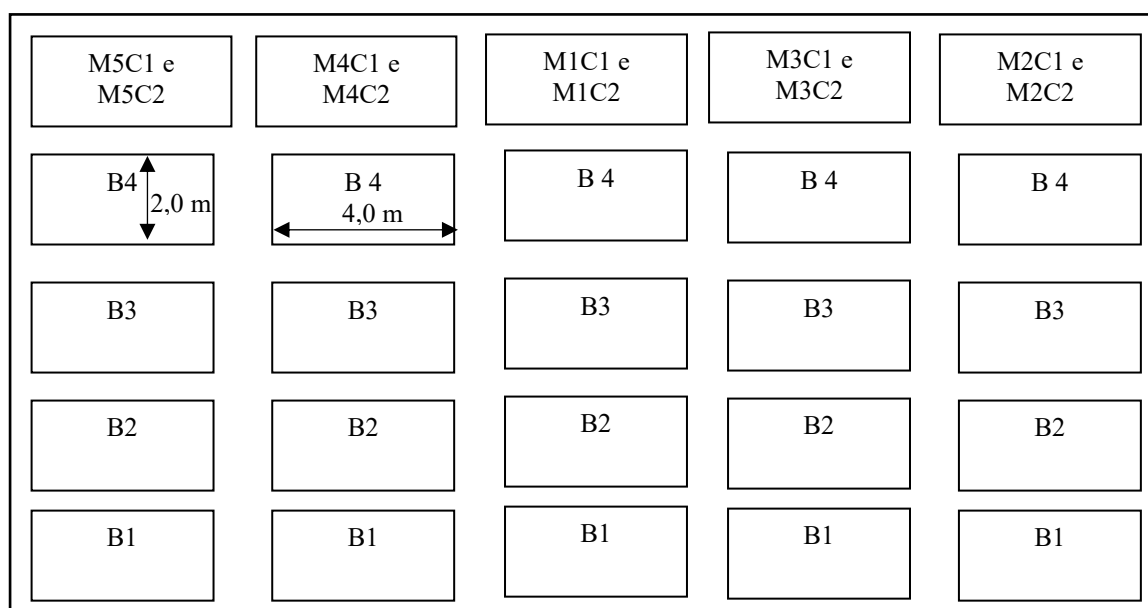


FIGURA 1. Croqui da área experimental com distribuição dos tratamentos da microaspersão nos ciclos de cultivo de soja C1 e C2.

4.4.2 Déficit hídrico nas fases específicas do ciclo da cultura utilizando irrigação por gotejamento subsuperficial

No ano de 2020 foi conduzido um ensaio utilizando a irrigação por gotejamento subsuperficial. Nesse experimento foram utilizados cinco tratamentos, cada um constituído por quatro repetições, disposto em blocos casualizados (B1 a B4, Figura 2). Os tratamentos corresponderam à suspensão da irrigação por um determinado período, sendo GS1 de 7 dias, GS2 de 14 dias, GS3 de 21 dias, GS4 de 30 dias e GS5 sem irrigação, sendo que após estes períodos foi realizada a irrigação suficiente para elevar a umidade do solo próximo à capacidade de campo.

Na irrigação por gotejamento subsuperficial cada parcela experimental possui 2,0 m de largura, equivalente a quatro linhas de plantas e 4,0 m de comprimento.

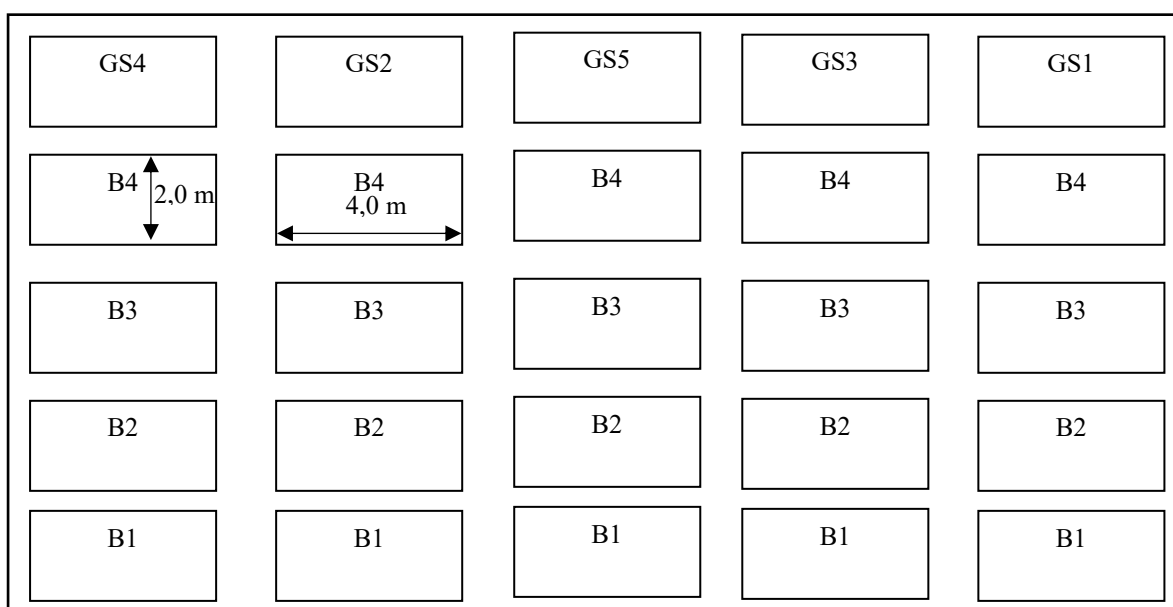


FIGURA 2. Croqui da área experimental com distribuição dos tratamentos do gotejamento subsuperficial em todos os ciclos de cultivo da soja, em 2020.

4.5 DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

4.5.1 Irrigação por microaspersão nos ciclos de cultivo C1 (2019) e C2 (2020)

Foi utilizado o sistema de irrigação por microaspersão, composto por 12 microaspersores por tratamento, espaçados de 3,0 m x 5,0 m (Figura 3A), com vazão individual de 0,087 m³ h⁻¹, operando na pressão de serviço de 200 kPa, com o diâmetro molhado de 8,5 m e com intensidade de aplicação de 5,3 mm h⁻¹. Os microaspersores foram instalados a um metro de altura (Figura 3B), sendo que a tubulação da linha lateral foi de polietileno de 16 mm de diâmetro externo e 18 m de comprimento.

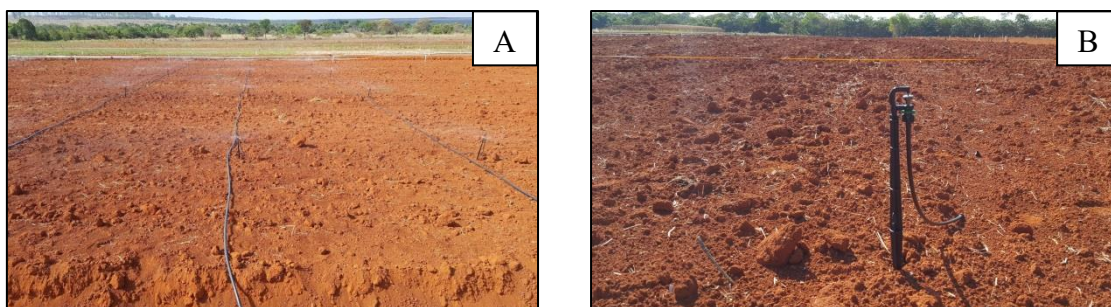


FIGURA 3. Unidade operacional da irrigação por microaspersão (A) e detalhe do microaspersor utilizado no experimento (B) utilizados nos ciclos de cultivo da soja C1 e C2.

4.5.2 Uniformidade de distribuição da irrigação por microaspersão

Foi realizado ensaio nos blocos 3 e 4 para estimar da irrigação por microaspersão para estimar o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) (1942) (Equação 2).

$$CUC=100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x_{med}|}{n \times x_{med}} \right) \quad (2)$$

em que:

CUC: coeficiente de uniformidade de Christiansen, %;

x_i : lâmina coletada em cada pluviômetro, mm;

x_{med} : lâmina média de todos os pluviômetros, mm e

n: número de pluviômetros.

O ensaio foi realizado com coletores com diâmetro da boca de entrada de 0,08 m dispostos sobre o solo no espaçamento de 1,0 x 1,0 m, dentro de um quadrante que recebe água de quatro microaspersores, portanto com sobreposição. O teste consistiu em colocar o sistema de irrigação em funcionamento durante uma hora operando com uma pressão de 200 kPa, monitorada por meio de um manômetro de Bourdon, com precisão de 0,10 kPa. Foi utilizado o método volumétrico direto com o auxílio de uma proveta graduada com precisão de 1 mm.

A partir do ensaio, os valores de CUC foram de 89% para o bloco 3 e 86% para o bloco 4. Para o manejo da irrigação considerou que o CUC médio do sistema de irrigação por microaspersão de 87,5%.

4.5.3 Irrigação por gotejamento subsuperficial (GS), no ano de 2020

As linhas laterais foram de tubos gotejadores enterrados a 0,3 m de profundidade no solo e distantes a 0,9 m entre si, totalizando 10 linhas laterais por unidade operacional

(Figura 6A e 6B). Os tubos gotejadores foram de polietileno com diâmetro nominal de 14 mm e interno de 13,6 mm, com 20 m de comprimento. Os gotejadores foram do tipo labirinto, autocompensantes, inseridos no tubo com espaçamento de 0,4 m, vazão de 2 L h⁻¹ e operando a 200 kPa e uma intensidade de aplicação de 5,55 mm h⁻¹. No final de cada tubo gotejador foram instaladas válvulas de ar de duplo efeito para evitar pressões negativas nas linhas laterais e intrusão de impurezas através dos emissores no momento da depressurização do sistema de irrigação.

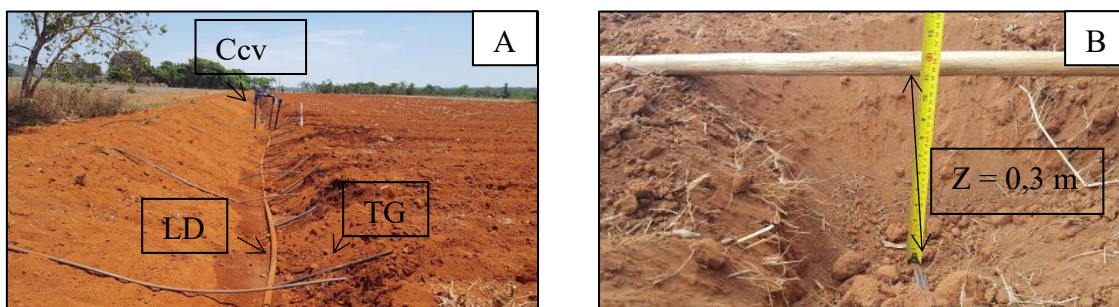


FIGURA 4. Tubos gotejadores subsuperficiais (TG), linha de derivação (LD) (A) na profundidade (Z) de 0,3 m (B) e cavalete com válvula solenoide (Ccv).

4.5.4 Uniformidade de distribuição de água do sistema de irrigação gotejamento subsuperficial e automação da irrigação

Foi determinada a uniformidade de emissão de água pelo gotejamento subsuperficial (Equação 3) (FAVETTA & BOTREL, 2001). A determinação foi realizada coletando, com o auxílio de um copo plástico, as vazões do primeiro gotejador, dos gotejadores localizados a 1/3 e a 2/3 do comprimento da linha lateral e do último gotejador. As linhas laterais que foram amostradas, ao longo da linha de derivação, foram a primeira, as localizadas a 1/3 e 2/3 do comprimento da linha de derivação, e a última linha lateral (KELLER & KARMELI, 1975).

Os volumes foram coletados em um pluviômetro durante um período de cinco minutos e determinados o volume com o auxílio de uma proveta graduada com precisão de 1 mL. A unidade operacional funcionou na pressão de serviço de 200 kPa monitorada por meio de um manômetro de Bourdon, com precisão de 0,10 kPa, instalado no final da última linha lateral da unidade operacional da qual foi realizado o ensaio.

$$UD = \left(1 - \frac{Sq}{\bar{q}}\right) \times 100 \quad (3)$$

em que:

UD: uniformidade de distribuição, %;

Sq: desvio padrão da vazão dos gotejadores, L h⁻¹;

\bar{q} : vazão média dos gotejadores, L h⁻¹.

Devido o sistema de irrigação ser enterrado no solo, foi necessário cavar a uma trincheira de 0,4 m, distância necessária para visualizar o gotejador e colocar o coletor de plástico sob o tubo gotejador sem alterar a sua disposição no campo.

A partir do ensaio, foi obtido um valor de UD de 95% para o gotejamento subsuperficial instalado em um Latossolo vermelho.

A automação da irrigação foi controlada por válvulas solenoides, sendo que cada uma destas foi acionada por um controlador de irrigação com 16 estações (Figura 5A). Já o cabeçal de controle foi composto por dois registros de esfera de 32 mm, filtro de disco de 125 microns (130 mesh) com capacidade de $5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e uma motobomba de 1,5 cv (Figura 5B).

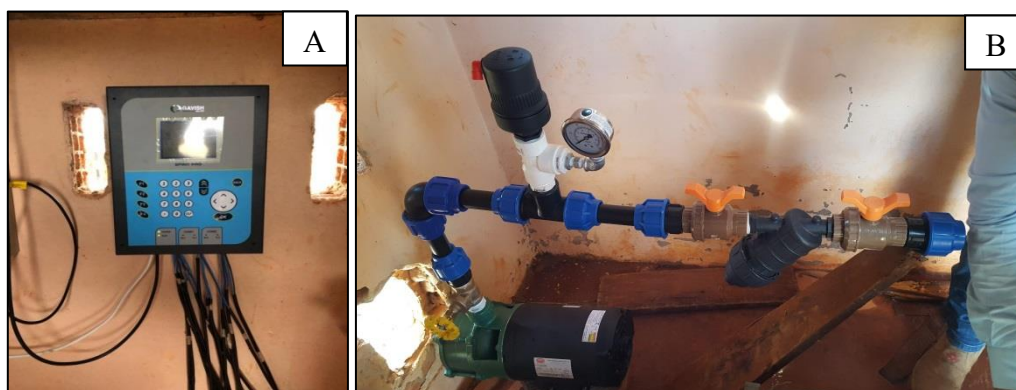


FIGURA 5. Painel de automação do sistema de irrigação (A) e cabeçal de controle constituído por conjunto moto-bomba, filtro de disco e registros (B).

4.5.5 Irrigação por aspersão para calibração dos parâmetros U e α do Modelo de Ritchie

A área em que foi instalado o ensaio para a calibração dos parâmetros U e α do Modelo de Ritchie foi irrigada por um sistema de irrigação convencional composto por duas linhas laterais, sendo que cada linha lateral era constituída por três aspersores setoriais com o espaçamento $9 \text{ m} \times 9 \text{ m}$ (Figura 6). A vazão individual de cada aspersor era de $0,55 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, com um diâmetro molhado de 20 m, resultando em uma intensidade de aplicação de $6,7 \text{ mm h}^{-1}$ operando com uma pressão de 250 kPa. Os aspersores foram instalados na altura de 1,5 m utilizando tubos de polietileno com diâmetro nominal de 17 mm. As linhas laterais foram compostas por tubulações de polietileno com 32 mm de diâmetro externo e 18 metros de comprimento.

O croqui da disposição dos sistemas de irrigação por aspersão convencional para ajuste do modelo de Ritchie, microaspersão (anos de 2019 e 2020) e gotejamento subsuperficial (no ano de 2020) utilizado no cultivo de soja são apresentados na Figura 5. A linha de principal e de derivação, tanto para os setores de microaspersão como por gotejamento subsuperficial, foi constituída por tubulação de polietileno com 32 mm de diâmetro externo.

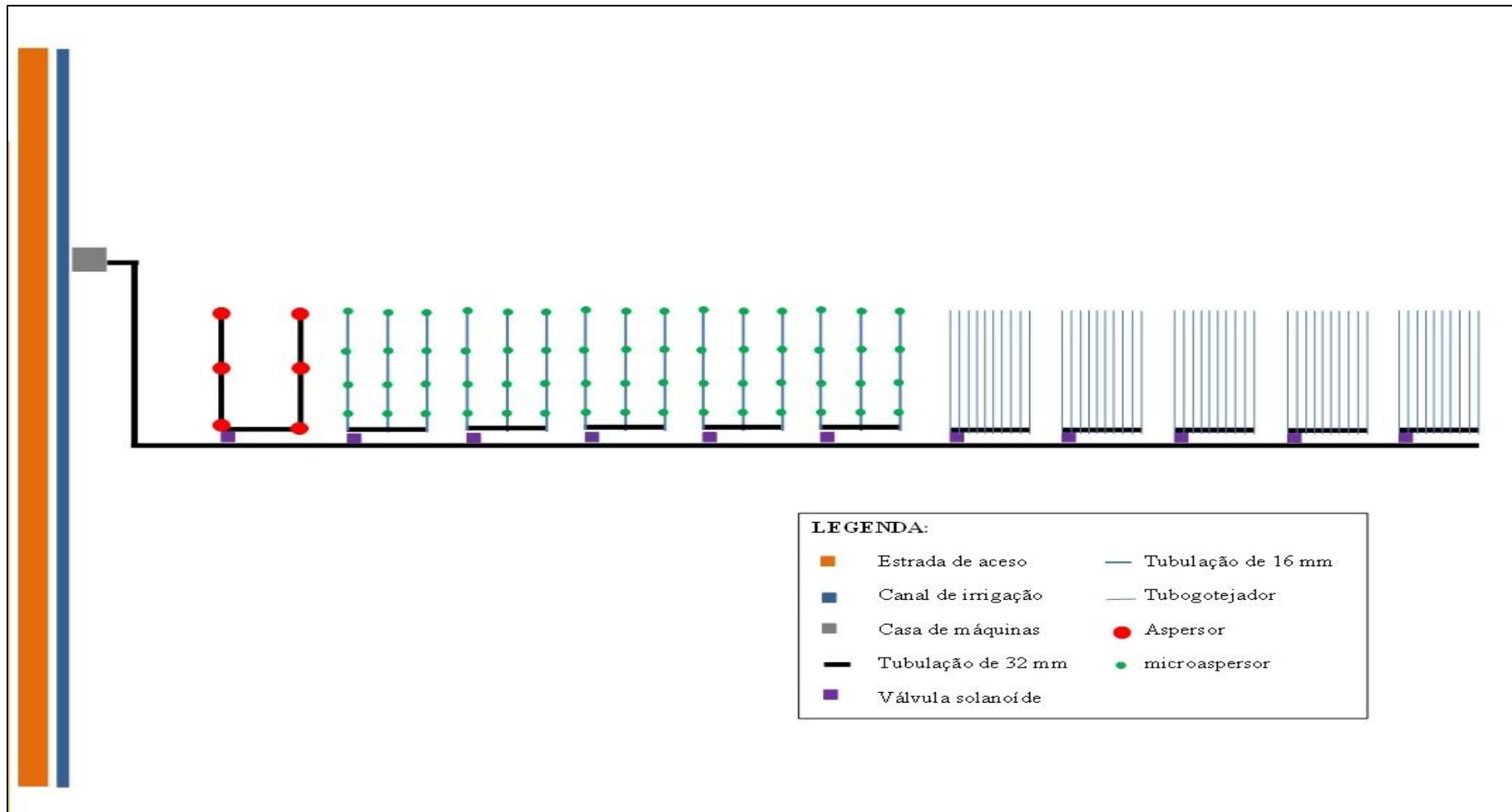


FIGURA 6. Croqui da disposição dos sistemas de irrigação por aspersão convencional para ajuste do modelo de Ritchie, microaspersão e gotejamento subsuperficial utilizado no cultivo de soja nos anos de 2019 e 2020.

4.5.6 Uniformidade de distribuição da irrigação por aspersão convencional

Para estimar o coeficiente de uniformidade de aplicação de Christiansen (1942) foram realizados dois ensaios utilizando coletores com um diâmetro de abertura de 0,08 m dispostos na área irrigada por aspersão com um espaçamento de 2,0 m x 2,0 m apoiados em hastes com 1,0 m de altura.

Os testes consistiram em colocar o sistema de irrigação por aspersão em funcionamento durante uma hora com uma pressão na saída do conjunto motobomba de 320 kPa e no final da linha lateral de 250 kPa. A pressão do sistema, durante o teste de uniformidade, foi monitorada por meio de dois manômetros de Bourdon, um instalado na saída do conjunto motobomba e outro instalado no final da linha lateral, com uma precisão de 0,10 kPa.

Após esse período de funcionamento, os volumes recolhidos pelos coletores foram quantificados e transformados em lâmina de irrigação utilizando uma proveta, que acompanha o conjunto de coletores, com uma precisão de 1,0 mm. De posse dessas lâminas, o CUC foi calculado utilizando a Equação 4.

$$CUC=100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x_{med}|}{n \times x_{med}} \right) \quad (4)$$

em que:

CUC: coeficiente de uniformidade de Christiansen, %;

x_i : lâmina coletada em cada pluviômetro, mm;

x_{med} : lâmina média de todos os pluviômetros, mm e

n: número de pluviômetros.

Levando em conta as lâminas de irrigação obtidas nos ensaios, os valores encontrados do CUC foram de 86% para o primeiro teste e de 85% para o segundo teste. Com isso, foi considerado que o CUC para o sistema de irrigação por aspersão convencional foi de 87%.

4.6 MONITORAMENTO DA UMIDADE DO SOLO UTILIZANDO A MICROASPERSÃO NO C2 E GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL EM 2020

A lâmina de água no solo consumida no dia atual (LDA) foi obtida considerando o somatório da lâmina de água no solo no dia anterior (LAS_{i-1}) com a evapotranspiração

(ETc_i), e subtraindo a lâmina precipitada atual (P_i), conforme descrito por Bernardo et al. (2009) (Equação 5).

$$LDA = LAS_{i-1} - ETc_i + P_i \quad (5)$$

em que:

LDA: lâmina de água no solo consumida no dia atual, mm;

LAS_{i-1} : lâmina de água no solo no dia anterior, mm;

ETc_i : evapotranspiração atual da cultura, mm e

P_i : precipitação no dia atual, mm.

A ET_o foi calculada pela Equação de Penman – Monteith (ALLEN et al., 1998) utilizando os dados meteorológicos oriundos de uma estação agrometeorológica, que multiplicado pelo K_c , 0,35, 0,75, 1,15, 0,75 nas fases inicial, 13 dias, desenvolvimento, 30 dias, frutificação, 30 dias, e maturação 18 dias, respectivamente (ALLEN et al., 1998), obtendo a ETc_i e o K_l foi considerado igual a 1,0. A P_i (precipitação) foi obtida por dois pluviômetros instalados nas extremidades na área experimental.

A umidade do solo no dia anterior para realizar o balanço de água no solo, e conseqüentemente, o manejo da irrigação, com aplicação do déficit hídrico em todo o ciclo, foi determinada diariamente por meio de secagem em estufa de ar forçado (EMBRAPA, 1997).

As amostras do solo foram coletadas em todas as parcelas experimentais nas profundidades de 0,0 – 0,2 m e de 0,2 – 0,4 m, com duas repetições por profundidade. Essas foram retiradas em dois pontos aleatórios em cada parcela, sendo que foram retiradas na entrelinha de plantio. Após a coleta, o solo foi acondicionado em recipiente com tampa de alumínio, vedado com fita crepe e encaminhado ao Laboratório de Física do Solo da Embrapa Cerrados. No laboratório, as amostras foram pesadas, obtendo a massa úmida do solo, e colocadas em uma estufa a 105 °C por um período de 24 horas. Após esse período, as amostras foram novamente pesadas, obtendo a massa seca das amostras. A umidade atual do solo foi calculada pela diferença entre a massa úmida e seca de cada amostra (Equação 6).

$$U_a = \frac{M_u - M_s}{M_s - M_r} 100 \quad (6)$$

em que:

U_a : umidade do solo em base peso, %;

Mu: massa úmida do solo, g;

Ms: massa seca do solo, g;

Mr: massa do recipiente, g.

A lâmina de água no solo no dia anterior foi determinada pela Equação 7.

$$LAS_{i-1} = \frac{(U_{cc}-U_a)}{10} \times D_s \times Z \quad (7)$$

em que:

LAS_{i-1}: lâmina de água no solo no dia anterior, mm;

U_{cc}: umidade do solo na capacidade de campo em base peso, %;

U_a: umidade do solo em base peso, %;

D_s: densidade do solo, 1,10 g cm⁻³;

Z: profundidade efetiva do sistema radicular, cm.

4.7 MANEJO DA IRRIGAÇÃO NA MICROASPERSÃO E NO GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL NOS CICLOS DE 2019 E 2020

O manejo de irrigação nos tratamentos irrigados por microaspersão foi realizado de maneira individual para cada tratamento. Nos tratamentos M1C1, M2C1 e M3C1 o turno de rega foi de dois dias para que a umidade do solo não extrapole o intervalo de umidade crítica de cada tratamento. Já nos tratamentos M4C1 e M5C1 o turno de rega foi variável, sendo que as irrigações ocorreram no momento em que a umidade do solo atingiu valores próximos à umidade crítica de cada tratamento.

No ano de 2020, o manejo de irrigação nos tratamentos irrigados por microaspersão foi realizado de maneira individual para cada tratamento. O turno de rega foi variável, sendo que as irrigações ocorreram no momento em que a umidade do solo atingiu os valores próximos à umidade crítica de cada tratamento (Equação 8). No tratamento M5, o manejo da irrigação foi com base na umidade do solo obtida em estufa, tendo em vista que a umidade crítica para esse tratamento foi menor do que a capacidade de registro dos potenciais matriciais críticos pelo tensiômetros, antes que ele escorve.

$$U_c = \frac{(\theta_{cc}-\theta_{PMP})}{10} \times D_s \times Z \times f \quad (8)$$

em que,

U_c: disponibilidade de água no solo até umidade crítica, mm;

θ_{cc}: umidade do solo na capacidade de campo, em base peso, %;

θ_{PMP}: umidade do solo no ponto de murcha permanente, em base peso, %;

D_s: densidade do solo, g cm⁻³;

Z: profundidade efetiva do sistema radicular da cultura, cm e
f: fator de depleção de água no solo, adimensional.

Para obter a curva de retenção de água no solo, e com isso, determinar os parâmetros θ_{CC} , θ_{PMP} e θ_T , foram coletadas seis amostras de solo indeformadas nas profundidades de 0,0 – 0,2 m, 0,2 – 0,4 m e 0,4 – 0,6 m. As amostras foram coletadas utilizando um trado do tipo TIA e encaminhadas ao Laboratório de Física do solo da Embrapa Cerrados.

Para a obtenção da curva, foi determinada a umidade do solo nas tensões de 1, 3, 6, 10, 33, 60, 800 e 1500 kPa utilizando um extrator de Richards, conforme descrito pela Embrapa (1997). A curva de retenção foi ajustada matematicamente pela Equação 9, descrita por Van Genuchten (1980).

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + (\alpha \psi_m)^n} \right]^m \quad (9)$$

em que:

θ : umidade volumétrica do solo, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

θ_r : umidade volumétrica residual, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

θ_s : umidade volumétrica na saturação, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

ψ_m : potencial matricial, kPa;

α , n e m : parâmetros de ajuste do modelo.

O parâmetro m foi obtido conforme a restrição sugerida por Mualem (1976), Equação 10.

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (10)$$

Os parâmetros θ_r , θ_s , α e n foram obtidos utilizando o *software* RETC (Van GENUCHTEN et al., 2009). As curvas de retenções, para as profundidades de 0 - 20 cm, 20 - 40 cm e de 40 - 60 cm, para o solo no qual foi desenvolvido o estudo estão apresentadas na Figura 7 (A), (B) e (C), respectivamente.

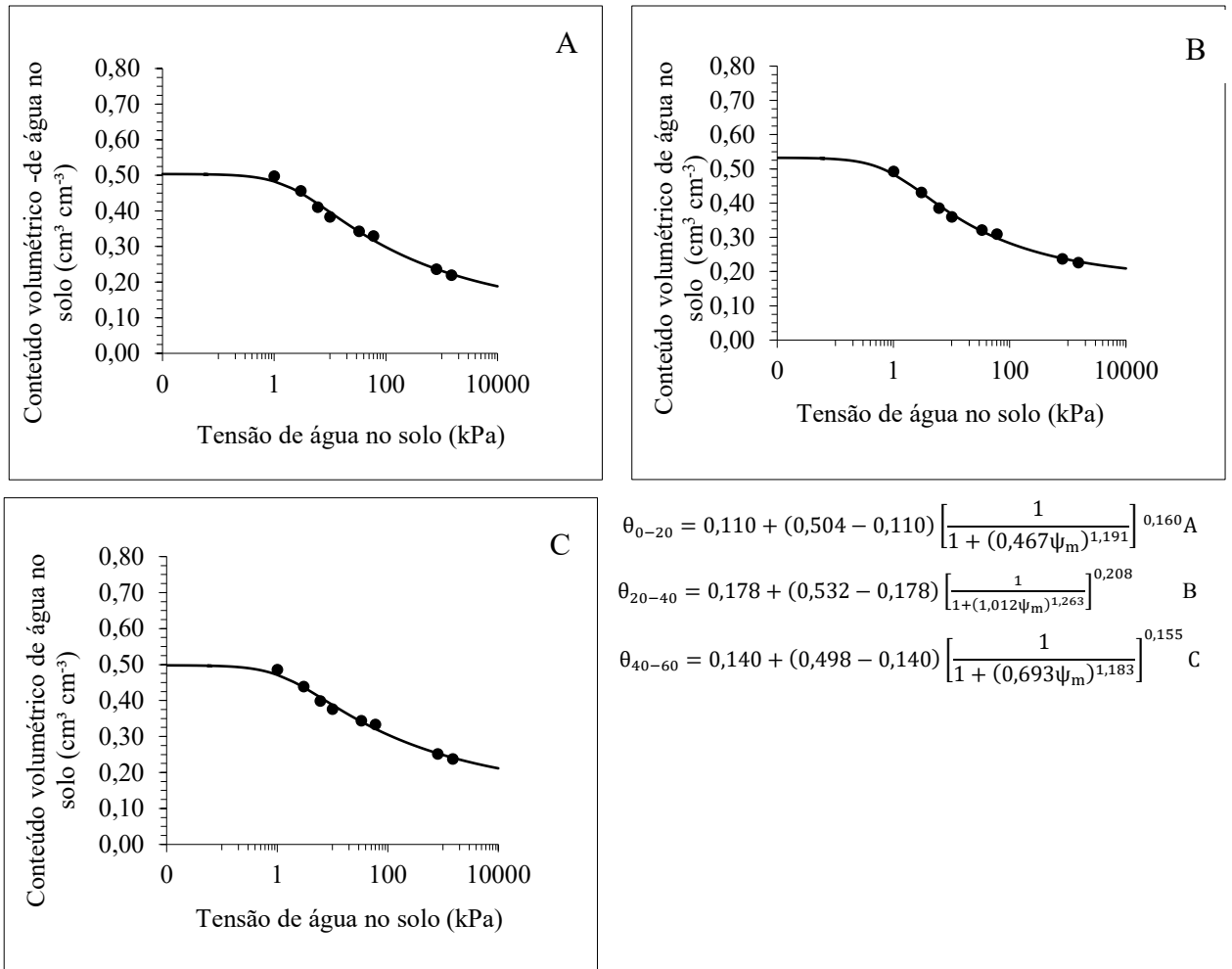


FIGURA 7. Curva de retenção de água no solo de Cerrado, nas profundidades de 0-20 cm (A), de 20 - 40 cm (B) e 40 - 60 cm (C), utilizado para o cultivo de soja irrigada por microaspersão, C1 e C2 e gotejamento subsuperficial, em 2020.

Para o manejo da irrigação da soja utilizando o gotejamento subsuperficial, nos tratamentos sem restrição hídrica, foi mantida a umidade do solo entre a capacidade de campo e a umidade crítica, U_c (Equação 11). Logo, as irrigações foram realizadas quando a umidade do solo estava próxima da U_c .

$$U_c = \frac{(\theta_{CC} - \theta_{PMP})}{10} \times D_s \times Z \times f \quad (11)$$

em que:

U_c : disponibilidade de água no solo na umidade crítica, mm;

θ_{CC} : umidade do solo na capacidade de campo, em base peso, %;

θ_{PMP} : umidade do solo no ponto de murcha permanente, em base peso, %;

D_s : densidade do solo, g cm⁻³;

Z : profundidade efetiva do sistema radicular da cultura, cm e

f : fator de depleção de água no solo, adimensional.

Foi adotado o fator de depleção (f) de água no solo para a cultura da soja de 0,5, conforme citado por Bernardo et al. (2009).

O tempo de irrigação, para os tratamentos utilizando a irrigação por microaspersão e gotejamento subsuperficial, foi calculado em função da disponibilidade total de água no solo para cada tratamento (DTAi) e da lâmina de água consumida (LDA) (Equação 12).

$$T_i = \frac{DTAi - LDA}{E_a \times I_a} \quad (12)$$

em que:

Ti: tempo de irrigação, h;

DTAi: disponibilidade de água no solo para cada tratamento, mm;

LDA: lâmina de água consumida no solo, mm;

Ea: eficiência de aplicação do sistema, decimal e

Ia: intensidade de aplicação do emissor, mm h⁻¹.

4.8 DESEMPENHO DA CULTURA DA SOJA

O crescimento da cultura da soja foi avaliado quinzenalmente e, para isso, foram colhidas as plantas de 0,5 m linear por parcela. As plantas foram acondicionadas em embalagens plásticas, devidamente identificadas, e encaminhadas ao Laboratório de Biologia Vegetal da Embrapa Cerrados onde foram separadas em folhas, raízes e vagens. Foram avaliadas as seguintes características biométricas:

Altura das plantas (Ap): foi obtida a altura de dez plantas em cada bloco, em cm, utilizando uma régua milimetrada, com precisão de 1 mm, medindo desde a haste na inserção no solo até o final da ramificação superior.

Massa seca (Ms): As partes vegetais das plantas de soja foram acondicionadas em sacos de papel graft e colocadas em uma estufa de secagem com circulação de ar forçada por um período de 72 h a 65 °C para obter a massa seca de cada parte vegetal (folhas, hastes, raízes e vagens) e, com isso, acompanhou-se o incremento de biomassa durante o ciclo da cultura.

No momento da colheita, foram avaliadas as características das plantas de soja submetidas a diferentes níveis de água no solo e restrições hídricas em uma determinada fase do ciclo da cultura:

Produtividade (Prod): Ao final do ciclo da cultura, em cada tratamento foi estimada a produtividade média, em t ha⁻¹.

Peso médio dos grãos de soja (Pmg): O peso médio de mil grãos foi obtido em balança com precisão de 0,001 g.

Número de vagem por planta e o número de grãos por vagem (Nvp): Foi quantificado o número de vagem por planta e o número de grão por vagem em cinco plantas úteis por parcela experimental.

Eficiência do uso da água (EUA): A EUA, em $\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$, para cada tratamento, foi obtida pela razão da produtividade alcançada, em kg ha^{-1} , pela lâmina aplicada em mm (SANDRI et al., 2014).

Índice de Área Foliar (IAF): O índice de área foliar, das plantas cultivadas no ciclo de 2019, foi determinado pela razão entre a área foliar média por planta e densidade de plantio. Para calcular a área foliar, duas plantas por repetição foram coletadas aos 87, 95, 111 e 130 dias após a semeadura. Após a coleta, as plantas foram acondicionadas em sacos plásticos e encaminhadas ao Laboratório de Biologia Vegetal da Embrapa Cerrados, onde as folhas foram destacadas das hastes e a área foliar foi medida por meio de um planímetro eletrônico (LI-31000C)

Índice de Cobertura do solo (ICS): A cobertura do solo pela cultura da soja irrigada por microaspersão foi realizada utilizando o aplicativo para celular CANOPEO (PATRIGNANI & OCHSNER, 2015). Esse aplicativo foi desenvolvido a partir do sistema R-G-B (*red, green e blue*), sendo que é levado em consideração as razões R/G e B/G para criação da imagem binária em que os pixels em branco correspondem as áreas verdes da imagem e os pixels pretos, as áreas sem cobertura do dossel da cultura (Figura 8).

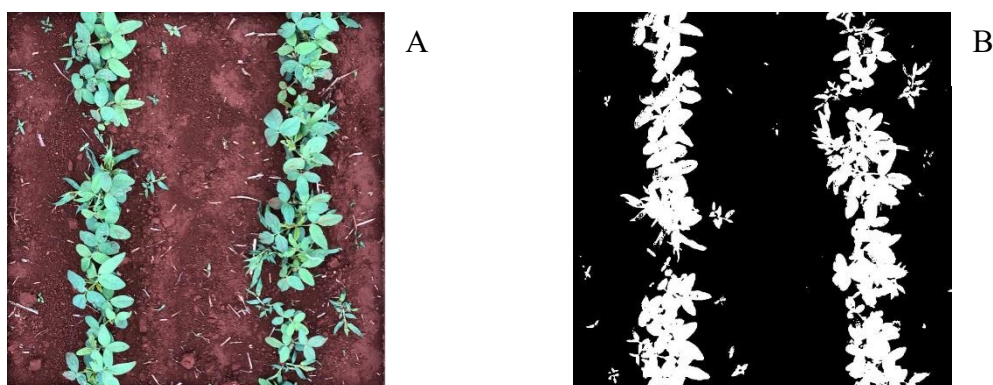


FIGURA 8. Imagem utilizada (A) e analisada pelo aplicativo Canopeo (B) da cultura da soja irrigada por microaspersão para determinação do Índice de cobertura do solo (ICS).

Para a utilização do *software* foram obtidas, por meio de um *smartphone*, mantendo o ponto de coleta, quatro fotografias por repetição com uma área de 1 m². com o objetivo de garantir que a fotografia representasse a área estabelecida, foi utilizado um suporte com as dimensões de 1,0 m x 1,0 m e uma haste de suporte para o *smartphone* com 1,8 m.

4.9 INDICE SPAD

A avaliação do índice SPAD, nos ciclos C1 e C2, foi iniciada quando a cultura da soja apresentou o estágio de desenvolvimento fenológico V3 e finalizou com a maturação fisiológica dela, R8. As avaliações foram realizadas semanalmente, sendo as leituras efetuadas no terceiro trifólio desenvolvido do terço superior do dossel da planta. Em cada folha do trifólio foram executadas cinco leituras, sendo as leituras realizadas em cinco plantas por bloco, totalizando 20 plantas por tratamento. As avaliações foram realizadas com o auxílio do equipamento SPAD, Minolta 502.

4.10. AJUSTE DO MODELO DE RITCHIE

Os parâmetros U e α do Modelo de Ritchie foram calibrados utilizando diferentes níveis de palhada de milho sobre o solo, objetivando simular a interferência do plantio direto na evaporação de água do solo e nos parâmetros do modelo.

O parâmetro U foi determinado de maneira experimental utilizando microlisímetros de pesagem dispostos em quatro blocos inteiramente casualizados. Os tratamentos consideram cinco níveis de palhada de milho, sendo o nível P0 sem palhada sobre a superfície do solo, P3 com um nível de palhada equivalente a 3 t ha⁻¹, P6 com 6 t ha⁻¹, P9 com 9 t ha⁻¹ e P12 equivalente a 12 t ha⁻¹ (Figura 9).

Os microlisímetros de pesagem foram construídos em tubos de polietileno de venil (PVC), com diâmetro externo médio de 155 mm e interno de 150 mm e 150 mm de altura. Os microlisímetros foram preenchidos com solo proveniente da área de estudo, sendo que esse preenchimento foi realizado cravando os microlisímetros no solo com o auxílio de marreta e uma tábua. Após o preenchimento, os microlisímetros foram limpos, e na extremidade inferior foi colocado brita, com o objetivo de evitar a perda de solo, além de promover a drenagem no microlisímetro (Figura 9^a, B, C, D, E e F). A extremidade inferior foi vedada com tela mosquiteira, com uma malha de 16 mesh e com dimensão de 0,15 x 0,15 m, fixada com fita adesiva de alta resistência.

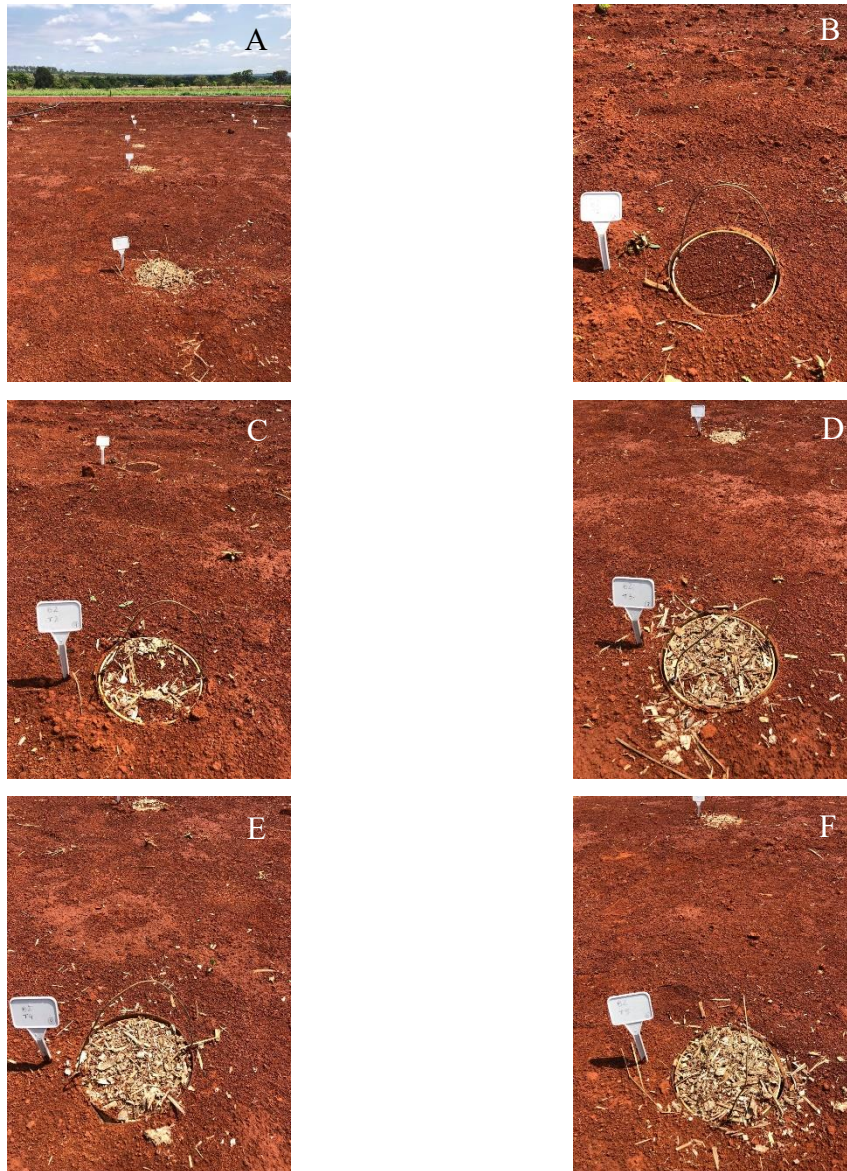


FIGURA 9. Visão geral do experimento (A) para determinação do parâmetro U do Modelo de Ritchie com o solo descoberto (B) e para os níveis de palhada equivalente à 3 t ha⁻¹ (C), 6 t ha⁻¹ (D), 9 t ha⁻¹ (E) e 12 t ha⁻¹ (F).

Os orifícios onde foram acondicionados os microlisímetros foram revestidos com uma membrana de polietileno Tereftalato de Etileno Glicol (PETG) com o propósito de evitar que o solo se aderisse às paredes externas do tubo.

A palha de milho utilizada para cobrir a superfície do solo foi seca em estufa de secagem de circulação de ar forçada por um período de 72 h a uma temperatura de 65 °C ou até a massa permanecer constante. Após a secagem, a palha foi pesada com massa equivalente a superfície dos microlisímetros e distribuída na sua superfície.

O acompanhamento da evaporação da água no solo com diferentes níveis de palhada foi realizado por meio de pesagens consecutivas até o momento que a massa do microlisímetro permaneceu constante, fato que ocorreu 16 dias após o início do experimento. A lâmina de água diária evaporada do solo foi obtida pela diferença de massa de cada microlisímetros entre duas pesagens consecutivas, conforme a Equação 12, descrita por Rodrigues et al (2005).

$$Lev(i, i + 1) = 12,7 \frac{E}{D^2} \quad (12)$$

em que:

Lev: lâmina de água evaporada do solo, mm;

E: evaporação da água do solo medida pelo microlisímetros i, g e

D: diâmetro interno do microlisímetro, cm.

O parâmetro α , mm dia^{-0,5}, para os níveis de palhada 0, 3, 5, 9 e 12 t ha⁻¹ foi definido com os valores da evaporação de água no solo obtidos após a mudança da fase 1 para a fase 2 do processo de evaporação no solo. O valor de α foi obtido pela inclinação da reta da regressão linear das lâminas evaporadas acumuladas na fase 2, em mm, pela raiz quadrada do tempo transcorrido após a mudança da fase 1 para fase 2, em dias, Rodrigues et al. (2005).

4.10 AVALIAÇÃO ECONÔMICA NOS CICLOS DE CULTIVO COM MICROASPERSÃO, C1 NO ANO DE 2019 E C2 EM 2020

A análise econômica para cada ciclo de cultivo da soja foi realizada a partir dos custos de produção fornecidos pela EMATER – DF (EMATER, 2025) para o primeiro e segundo semestre de 2024 e primeiro semestre de 2025. Os insumos apresentados no custo de produção foram ajustados para as doses utilizadas para os ciclos de 2019 e 2020 do cultivo de soja.

Para determinar a viabilidade econômica da cultura da soja, foram utilizadas as produtividades obtidas nos ciclos de 2019 e 2020 para os sistemas de irrigação por microaspersão e gotejamento subsuperficial. O preço médio de venda da saca de soja com 60 kg foi obtido pelos valores fornecidos pelo CEPEA nos anos de 2024 e 2025 (CEPEA, 2025).

Foi considerado, na avaliação econômica da produção de soja irrigada, o consumo de energia elétrica do conjunto motobomba dimensionada para a irrigação por

microaspersão e gotejamento subsuperficial, equivalente a um hectare. O valor do kWh, para os anos de 2024 e 2025, foi de acordo com o valor estabelecido pela Companhia Elétrica de Brasília (CEB) para cada ano, na época da colheita. Além disso, foi considerado o valor pago pela captação de água bruta, conforme o modelo de cobrança estabelecido pelo Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba (CBH Paranaíba, 2016).

A análise econômica foi realizada para cada tratamento aplicando o modelo de custo operacional desenvolvido pelo Instituto de Economia Agrícola de São Paulo (MATSUNAGA et al., 1976). Nessa metodologia, os custos são agrupados em duas categorias: na primeira, englobam os Custos Operacionais Efetivos (COE), que correspondem às despesas diretas com desembolso financeiro desde o preparo do solo até a colheita, tais como, sementes, fertilizantes, agrotóxicos, mão-de-obra, dentre outros; na segunda estão reunidos os Custos Indiretos (CI), que refletem os custos fixos e as despesas indiretas que o agricultor tem para a obtenção da produção de um hectare de soja, tais como: custo da terra, depreciações de equipamentos e instalações, salário de encarregado, impostos, etc. O Custo Total (CT) corresponde ao somatório dos dispêndios diretos e indiretos. A relação Benefício Custo (B/C) é o resultado do quociente entre a Receita Total da venda (RT) e o CT. Com os dados de produtividade ($\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) (P), foi obtida a receita total da venda (B) ($\text{R\$ ha}^{-1}$), obtido por $B = P \times \text{preço (R\$ kg}^{-1})$, o ponto de nivelamento é obtido por CT dividido pelo preço em $\text{R\$ kg}^{-1}$, e a margem de segurança, (%), obtida por $(CT - B)/B$.

5.11 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados experimentais das variáveis analisadas foram submetidos à análise de variância (ANOVA), comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de significância utilizando o programa estatístico R, bem como a análise de regressão, determinando o grau de significância dos tratamentos.

5. RESULTDOS E DISCUSSÃO

5.1 DADOS CLIMÁTICOS DURANTE O CICLO DE CULTIVO DA SOJA

A temperatura máxima, no ciclo C1, ano de 2019, variou de 24,6 °C no dia 15/08, a 36,8 °C em 20/09, com temperatura máxima média de 31,14 °C, enquanto a temperatura mínima variou entre 9,6 °C, observada no dia 14/08 e 20,8 °C em 21/09, e média de 17,09 °C (Figura 10A) no ano de 2019. Segundo Farias et al. (2007) para um melhor desenvolvimento da cultura da soja, a temperatura do ar deve estar entre 20 °C e 30 °C, sendo que o crescimento pleno da cultura ocorre próximo dos 30 °C. Porém de acordo com Peissari & Coimbra (2023) as altas temperaturas, próximas aos 40 °C, pode ocasionar o surgimento de sementes esverdeadas, com isso, diminuindo a qualidade e longevidade dessa semente pelo fato de não alcançarem a maturidade fisiológica.

A lâmina evapotranspirada no período de agosto a dezembro totalizou 729,50 mm, equivalente a uma média de 4,74 mm dia⁻¹. Por outro lado, observando as precipitações no período de condução do experimento, a lâmina total precipitada foi de 452 mm. Sendo que até os primeiros 88 dias após a semeadura (DAS), ocorreu uma lâmina acumulada de 26,4 mm. Após esse dia, as precipitações foram recorrentes, não sendo possível o controle dos estresses hídricos propostos (Figura 10C).

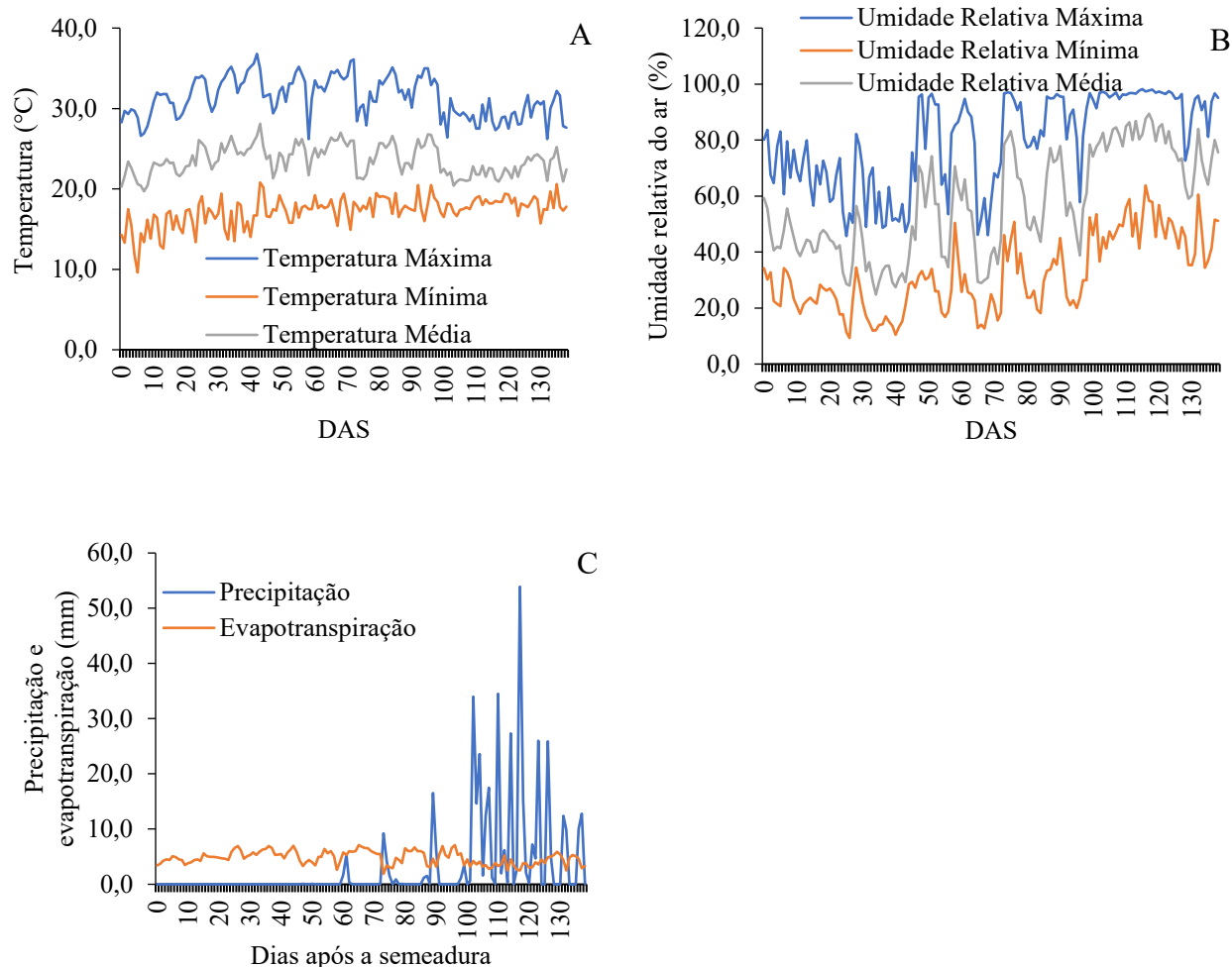


FIGURA 10. Dados climáticos durante o ciclo da cultura da soja submetida a diferentes lâminas de irrigação por microaspersão no período de agosto a dezembro de 2019. A: temperatura máxima, mínima e média. B: Umidade relativa do ar máxima, mínima e média. C: lâmina evapotranspirada e lâmina precipitada.

A temperatura máxima no ciclo de soja do ano de 2020 variou entre 39,06 °C, registrada no dia 4/10, e 22,31 °C, temperatura registrada no dia 31/10. No período de estudo, a temperatura máxima média foi de 30,16 °C. Por outro lado, as temperaturas mínimas variaram entre 19,80 °C, registrada no dia 16/10, e 8,40 °C, registrada no dia 27/08. Sendo que a temperatura mínima média durante a condução do experimento foi de 16,47 °C (Figura 11A). Assim como no ano de 2019, as temperaturas foram favoráveis ao desenvolvimento da cultura conforme Farias et al. (2007).

Nesse mesmo ano, 2020, a lâmina evapotranspirada, no período de 26/08 a 29/12, foi de 566,80 mm, sendo o valor médio de 4,50 mm dia⁻¹. Em relação as precipitações, no dia 22/09 ocorreu um evento com uma lâmina precipitada de 43,10 mm, momento em que a cultura apresentava 26 DAS. Após essa precipitação, a segunda chuva, que ocorreu

durante a condução do experimento, aconteceu no dia 10/10, 20 dias após a primeira, com uma lâmina precipitada de 17,10 mm. As precipitações ficaram recorrentes após o dia 18/10, não sendo mais possível o controle dos tratamentos propostos. Durante a condução do ensaio, a lâmina precipitada foi de 651,80 mm (Figura 11C).

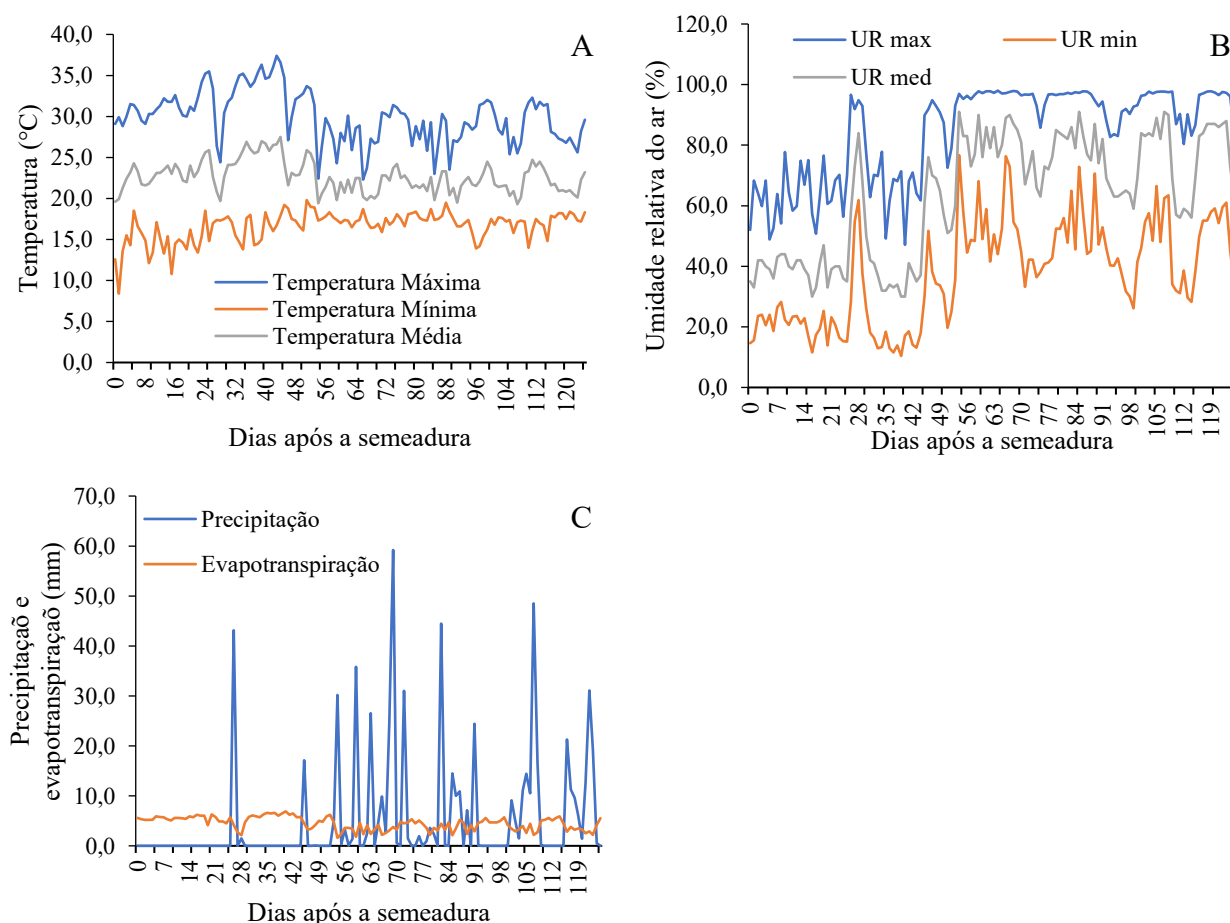


FIGURA 11. Dados climáticos durante o período de condução o ciclo da cultura da soja submetida a diferentes lâminas de irrigação utilizando a microaspersão (C2) e gotejamento subsuperficial (GS) no ano de 2020. A: temperatura máxima, mínima e média. B: Umidade relativa do ar máxima, mínima e média. C: lâmina evapotranspirada e lâmina precipitada.

5.2 COMPORTAMENTO DA UMIDADE DO SOLO PELO MÉTODO DA ESTUFA

Observando o comportamento da umidade do solo no ciclo de cultivo de soja no ano de 2019, no qual foi proposto um manejo de irrigação em função da porcentagem total de água no solo. Em decorrência do período chuvoso, o solo permaneceu no intervalo de umidade proposto até os 72 DAS, após esse momento, a umidade do solo ficou próxima a capacidade de campo para todos os tratamentos (FIGURA 12).

No intervalo em que foi aplicada a restrição hídrica no solo, o tratamento T1 apresentou teores de umidade no solo variando entre $31,95 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $29,15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, sendo que a umidade média no tratamento foi de $30,74 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. No T2 a umidade do solo alternou entre $32,23$ e $27,59 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, tendo como umidade média o valor de $29,02 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. No tratamento T3 a umidade do solo apresentou o valor máximo de $31,52 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e a mínima de $25,33 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, sendo observada uma umidade média de $27,55 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ durante o período de restrição hídrica. No T4 a umidade do solo apresentou valores entre $31,71 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $23,51 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, sendo que umidade média para o período foi de $23,51 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Por último, o tratamento T5 apresentou uma umidade no solo variando entre $31,91 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $22,20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, tendo uma umidade média de $24,57 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

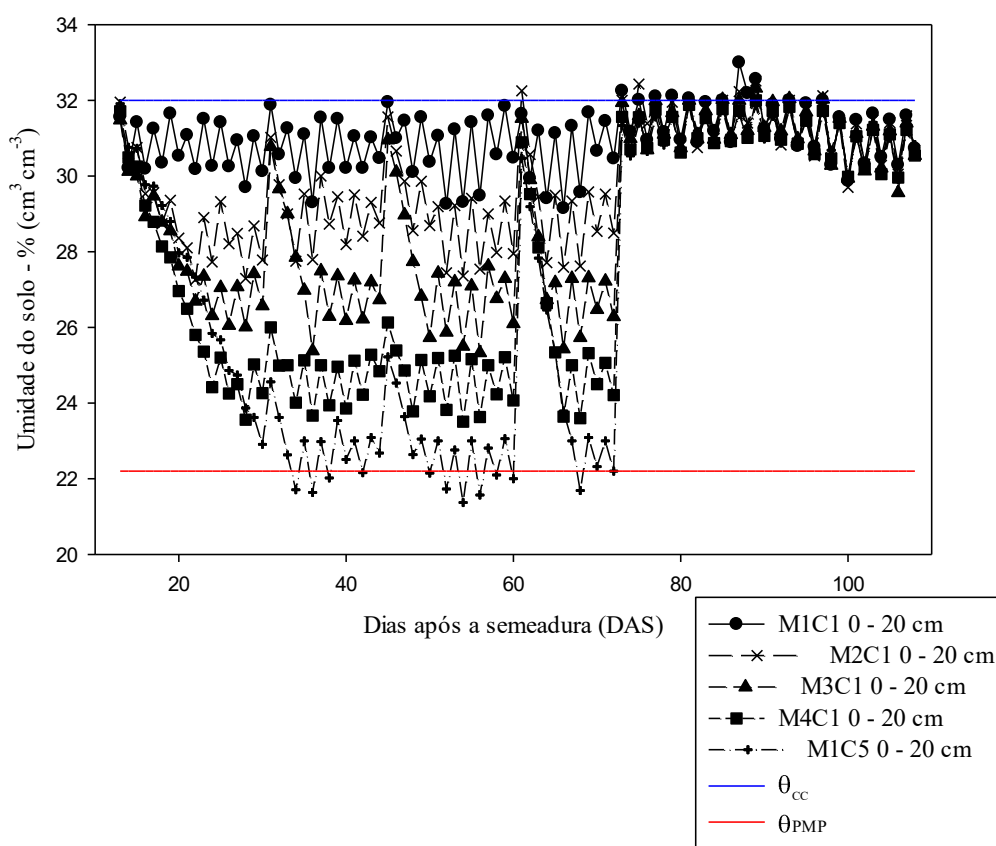


FIGURA 12. Comportamento da umidade solo obtida por meio do método padrão de estufa durante o ciclo da cultura da soja submetida a diferentes lâminas de irrigação aplicadas por meio de microaspersão no ciclo de cultivo C1, no período de 21 de agosto a 25 de dezembro de 2019.

Analisando o comportamento da umidade do solo, em função da distribuição das precipitações naturais no uso da microaspersão no C2, foi possível aplicar os tratamentos propostos até os 45 DAS. Os tratamentos corresponderam o fator de depleção de água no solo (f) de 0,1; 0,2; 0,3; 0,5 e 0,7, identificados como (T1), (T2), (T3), (T4) e (T5), respectivamente. O tratamento T1 a umidade mínima no solo na profundidade de 0 - 20 cm foi de 28,30 cm³ de água por cm³ de solo, já no T2 a umidade mínima na profundidade de 0 - 20 cm foi de 25,70 cm³ de água por cm³ de solo. Por sua vez, no T3 a umidade mínima para a mesma profundidade foi de 29,19 cm³ de água por cm³ de solo, já no T4 a umidade mínima do solo foi de 24,40 cm³ de água por cm³ de solo e no T5 a menor umidade do solo na profundidade de 0 - 20 cm foi de 21,05 cm³ de água por cm³ de solo (Figura 13). Com a chegada do período chuvoso, a umidade do solo aproximou da capacidade de campo para todos os tratamentos.

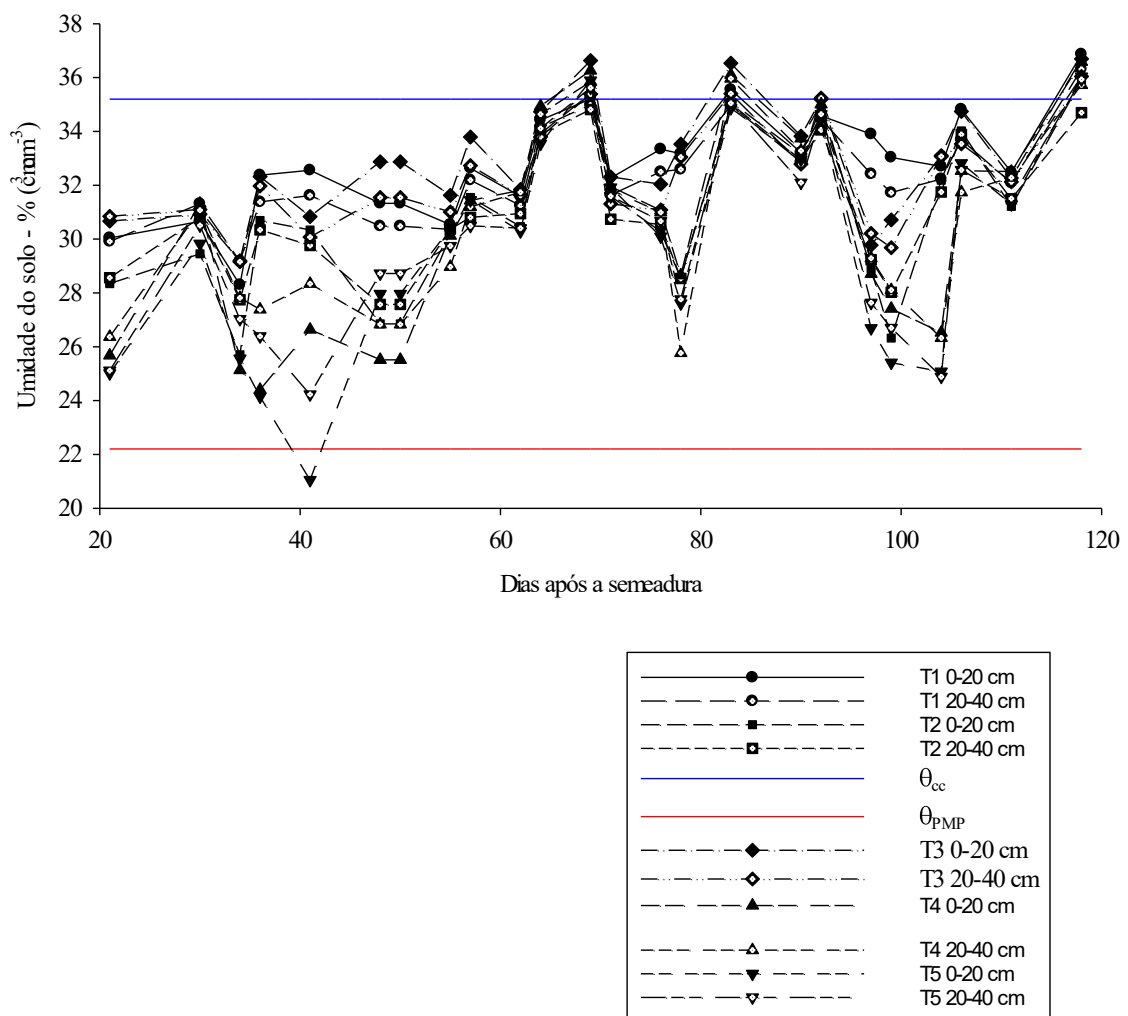


FIGURA 13. Comportamento da umidade solo obtida por meio do método padrão de estufa durante o ciclo da cultura da soja submetida a diferentes lâminas de irrigação aplicadas por meio de microaspersão no ciclo de cultivo C2, no período de 26 de agosto a 20 de dezembro de 2020.

Em relação às lâminas de irrigação utilizadas, o tratamento com menor déficit de água no solo foi aplicada uma lâmina total de irrigação de 114,48 mm, já no T2 a lâmina aplicada durante o ciclo da cultura da soja foi de 96,87 mm, no T3 de 155,12 mm e nos T4 e T5 foram de 31,51 mm e 35,84 mm, respectivamente (Figura 14).

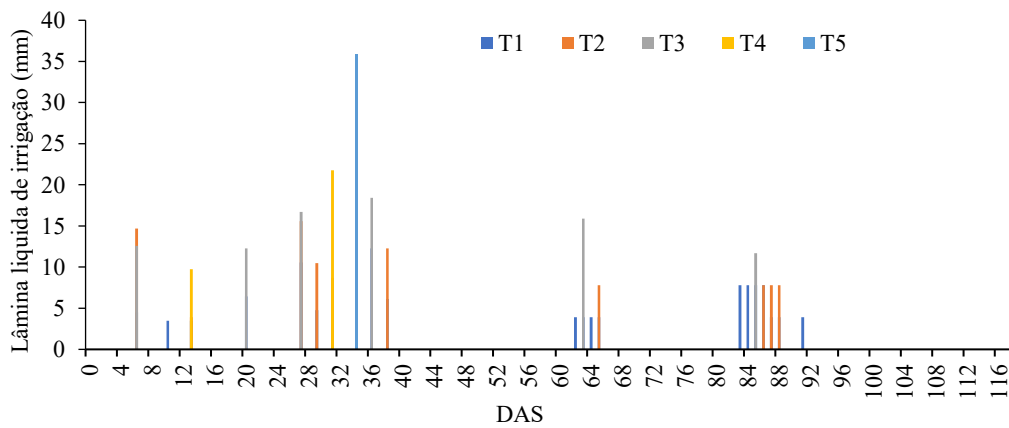


FIGURA 14. Lâminas brutas de irrigação aplicadas durante o ciclo da cultura da soja submetidas a lâminas de irrigação (T1 a T5) aplicadas por meio de microaspersão no período de 26 de agosto a 20 de dezembro de 2020.

5.3 ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR DA SOJA (IAF)

Observou-se que as lâminas de irrigação afetaram IAF da cultura da soja em todos os dias avaliados ao longo do ciclo C1 (87, 95, 111 e 130 DAS) (Tabela 4). Analisando os valores médios de IAF para os tratamentos propostos, foi possível observar que no início do ciclo da cultura apresenta valores baixos, que coincidem com o início da emissão dos trifólios pelas plantas. Com o desenvolvimento da cultura, os valores médios de IAF foram aumentando, alcançando o valor máximo de $3,51 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ aos 111 DAS. Com a senescência da cultura, esse valor diminuiu, chegando a $0,51 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ aos 130 DAS.

TABELA 4. Análise de variância do índice de área foliar (IAF) da cultura da soja sob diferentes lâminas de irrigação aplicadas por microaspersão no ciclo C1, ano de 2019 para diferentes DAS.

Fator de variação	87 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	0,422	0,106	5,04	0,0128
Bloco	3	0,139	0,046	2,22	0,1385
Resíduos	12	0,251	0,029		
Total	19	0,812			
CV	15,73%				
Média geral (m ² m ⁻²)	0,92				
Fator de variação	95 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	3,003	0,751	31,971	0,000003
Bloco	3	0,178	0,059	2,525	0,1069
Resíduo	12	0,282	0,023		
Total	19	3,463			
CV	14,56%				
Média geral (m ² m ⁻²)	1,05				
Fator de variação	111 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	13,505	3,376	6,286	0,0056
Bloco	3	0,727	0,242	0,451	0,721
Resíduo	12	6,445	0,537		
Total	19	20,677			
CV	20,88%				
Média geral (m ² m ⁻²)	3,51				
Fator de variação	130 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	1,256	0,314	15,478	0,00011
Bloco	3	0,055	0,018	0,910	0,46505
Resíduo	12	0,243	0,0203		
Total	19	1,555			
CV	28,20%				
Média geral (m ² m ⁻²)	0,51				

Legenda: GL: grau de liberdade, SQ: soma de quadrados, QM: quadrado médio, Fc: valor de F calculado, Pr>Fc: Probabilidade do F calculado ser maior que F tabelado.

O tratamento M1C1 apresentou os maiores valores absolutos de IAF aos 87, 95 e 111 DAS. Por outro lado, o tratamento M5C1 apresentou os menores IAF, no mesmo período, diferindo do tratamento M1C1 (Figura 14). Com isso, as lâminas de irrigação propostas influenciaram a cobertura do solo pela cultura da soja.

Ajustando os polinômios quadráticos do IAF em função dos dias após a semeadura, foi possível notar que o valor máximo do IAF foi encontrado aos 108 DAS no tratamento M1C1, 109 DAS para os tratamentos M2C1, M3C1 e M4C1 e 110 DAS no tratamento

M5C1. Portanto, a irrigação atuou não apenas na cobertura do solo pela cultura da soja, mas também quando a cultura alcançou o valor máximo de IAF (Figura 15).

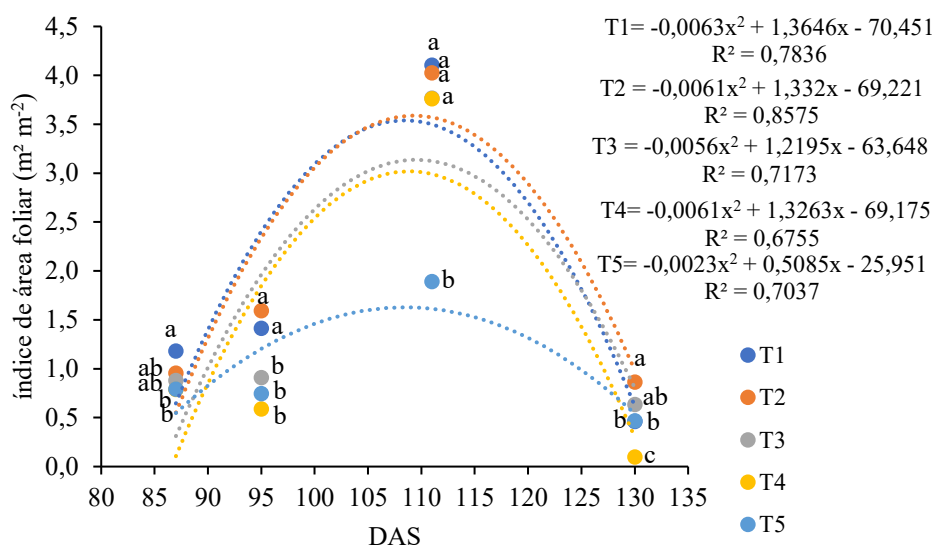


FIGURA 15. Índice de área foliar da cultura da soja sub a diferentes lâminas de irrigação irrigada por microaspersão no ciclo C1, em 2019. Letras minúsculas iguais entre as diferentes lâminas de irrigação não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey dentro de cada DAS.

O IAF, aos 87 DAS, no tratamento M1C1 foi de $1,18 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ sendo maior aos tratamentos M4C1 e M5C1, que apresentaram um valor de IAF de $0,79 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, em ambos os tratamentos. Dessa maneira, a manutenção do teor de umidade no solo próximo a capacidade de campo proporcionou uma cobertura do solo 33% superior aos tratamentos que mantiveram a umidade do solo próximo ao ponto de murcha permanente.

Mesmo com o início das precipitações naturais aos 89 DAS, não foi possível observar o efeito da lâmina precipitada, 42,90 mm, na avaliação realizada aos 95 DAS. Com isso, os tratamentos M1C1 e M2C1 apresentaram os maiores IAF, sendo de $1,41 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $1,59 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, respectivamente, diferindo dos demais tratamentos. Contudo, os tratamentos M3C1, M4C1 e M5C1 não apresentaram diferenças significativas entre si, sendo observados os valores de IAF de $0,91 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para M3C1; $0,59 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para M4C1; e $0,75 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para M5C1. Assim como aos 87 DAS, o teor de umidade no solo influenciou de maneira significativa no desenvolvimento da cultura da soja, sendo que o tratamento M2C1 apresentou um IAF 62,89% superior ao tratamento M3C1 (Figura 15).

Em contrapartida, aos 111 DAS, foi possível observar que as precipitações ocorridas até esse período, 195,60 mm, reduziram os efeitos do estresse hídrico na cultura

da soja. Logo, não foi possível identificar diferenças significativas do IAF entre os tratamentos M1C2, 4,10 m² m⁻²; M2C1, 4,03m² m⁻²; M3C1, 3,77 m² m⁻²; e M4C1, 3,76 m² m⁻². Apenas o tratamento M5C1 diferiu significativamente dos demais tratamento, apresentando o IAF de 1,89 m² m⁻². Mesmo com o efeito das chuvas sobre a cultura da soja, os tratamentos que sofreram uma maior restrição hídrica do solo até os 89 DAS apresentaram um menor IAF quando comparados aos tratamentos que receberam uma maior quantidade de água via irrigação. Com isso, o tratamento M1C1 apresentou um IAF 116% superior ao tratamento M5C1 (Figura 15).

Aos 130 DAS, próximo ao final do ciclo da cultura, ocorreu uma redução do IAF em todos os tratamentos propostos. Essa atenuação do IAF foi devido a senescência natural das folhas de soja. O IAF observado no tratamento M2C1 0,87 m² m⁻², apresentou-se superior aos demais tratamentos, diferindo significativamente dos IAF constatados nos tratamentos M4C1, 0,10 m² m⁻² e M5C1, 0,47 m² m⁻² (Figura 15). Esse fato demonstrou a importância da manutenção da umidade no solo para o melhor desenvolvimento da cultura da soja.

Os resultados obtidos no presente trabalho estão de acordo com os encontrados por Barzotto et al. (2016) e Oliveira et al. (2021) observaram que o IAF da cultura da soja é superior em plantas que passam por um menor estresse hídrico quando comparado a plantas com restrição de água. Além disso, Barzotto et al. (2016) reforça que os valores de IAF tendem a diminuir com a senescência da cultura.

5.4 ÍNDICE DE COBERTURA DO SOLO (ICS)

Para todas as datas avaliadas, houve diferenças significativas entre os percentuais do ICS pela cultura da soja submetida a diferentes lâminas de irrigação (Tabela 5). A partir dos valores médios de ICS, foi possível constatar um comportamento linear com o desenvolvimento da cultura. Com isso, aos 23 DAS, em média, 4,15% do solo estava coberto pelas plantas, alcançando o seu valor máximo de 86,43% do solo coberto aos 55 DAS.

TABELA 5. Análise de variância do índice de cobertura do solo (ICS) pela cultura da soja sub diferentes lâminas de irrigação (fator de depleção de f de 0,1, 0,2, 0,3, 0,5 e 0,7) aplicadas por microaspersão no ano de 2020.

Fator de variação	23 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	25,329	6,348	13,212	0,000236
Bloco	3	3,600	1,200	2,498	0,109368
Resíduos	12	5,765	0,480		
Total	19	34,758			
CV	16,68%				
Média geral (%)	4,15				
Fator de variação	30 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	328,650	82,163	12,790	0,00028
Bloco	3	3,300	1,100	0,171	0,91376
Resíduo	12	77,090	6,424		
Total	19	409,040			
CV	16,39%				
Média geral (%)	15,47				
Fator de variação	41 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	1024,060	256,016	10,134	0,000800
Bloco	3	211,260	70,421	2,787	0,086206
Resíduo	12	303,170	25,264		
Total	19	1539,500			
CV	15,94%				
Média geral (%)	31,53				
Fator de variação	43 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	2413,540	603,380	34,603	0,0000017
Bloco	3	252,840	84,280	4,833	0,0197596
Resíduo	12	209,250	17,440		
Total	19	2875,62			
CV	9,65%				
Média geral (%)	43,29				
Fator de variação	48 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	2153,150	538,290	16,648	0,000077
Bloco	3	139,590	46,530	1,439	0,280156
Resíduo	12	388,010	32,330		
Total	19	2680,740			
CV	9,07%				
Média geral (%)	62,71				

Continuação...

Fator de variação	50 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	2810,100	702,510	21,920	0,000019
Bloco	3	257,900	85,980	2,683	0,093854
Resíduo	12	384,600	32,050		
Total	19	3452,600			
CV	8,37%				
Média geral (%)	67,61				
Fator de variação	55 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	1837,260	459,320	27,235	0,00001
Bloco	3	56,690	18,900	1,120	0,37940
Resíduo	12	202,380	16,860		
Total	19	2096,330			
CV	4,57%				
Média geral (%)	86,43				

Legenda: GL: grau de liberdade, SQ: soma de quadrados, QM: quadrado médio, Fc: valor de F calculado, Pr>Fc: Probabilidade do F calculado ser maior que F tabelado.

No início do desenvolvimento da cultura, foi possível notar diferenças significativas no ICS entre os tratamentos propostos. O tratamento T3 (M3C2) apresentou o maior ICS, 5,73%, diferindo dos tratamentos T4 (M4C2), 3,21%, e T5 (M5C2), 2,64%. Cabe ressaltar que mesmo no início do desenvolvimento da cultura, os maiores teores de água no solo, representado pelo tratamento T3 (M3C2), promoveu uma elevação de 117% na ICS quando comparado às parcelas que sofreram excessivo déficit hídrico no solo, M5C2. Aos 23 DAS, o tratamento o T3 apresentou maior ICS (5,73%) em relação ao T4 (f = 0,5) (3,21%) e T5 (f = 0,7) (2,64%), enquanto aos 30 DAS o T1 (f = 0,1) apresentou ICS de 21,40%, maior ao T2 (f = 0,2) (15,01%), T4 (12,09%) e T5 (10,34%). Aos 41 DAS no T3 (f = 0,3) o ICS foi 40,89%, T1 de 35,64%, T4 de 31,55%, já o T2 foi de 30,30%, que não diferiu de T1, T3 e T4; já o ICS no T5 foi de 19,28%. Já aos 43 DAS o ICS no T3 foi 56,47%, T1 de 51,52%, T2 de 45,77% e T5 de 27,06% (Figura 16).

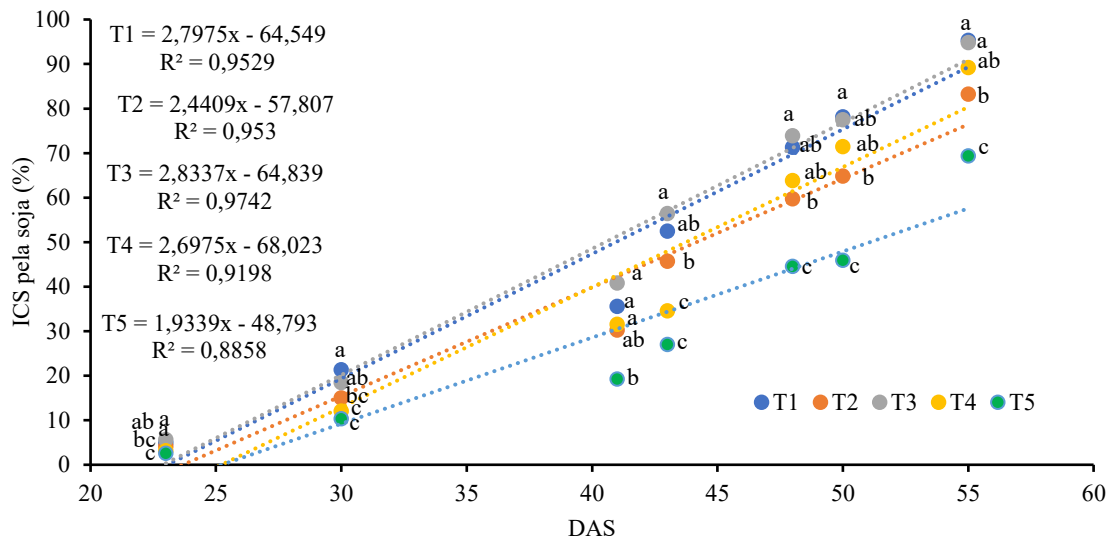


FIGURA 16. Índice de cobertura do solo (ICS) pela cultura da soja sub diferentes lâminas de irrigação aplicadas por microaspersão, no ano de 2020 (C2), em função do fator de depleção de água no solo de 0,1 (T1), 0,2 (T2), 0,3 (T3), 0,5 (T4) e 0,7 (T5). Letras minúsculas iguais entre as diferentes lâminas de irrigação não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey dentro de cada DAS.

Aos 48 DAS o T1 e T3 foram iguais com ICS de 71,37% e 73,91%, respectivamente, já o T4 diferiu significativamente do T3, com ICS de 59,76%. Por outro lado, os tratamentos T2 e T5 apresentaram ICS pela cultura da soja de 63,90% e 44,61%, respectivamente, com isso, esses tratamentos diferiram significativamente dos demais tratamentos aplicados. O ICS no T3 aos 50 DAS foi de 78,17%, sendo maior ao T2 (64,90%) e T5 (45,94%), já aos 55 DAS, os T1 e T3 apresentaram maior ICS, com valores de 93,37% e 94,88%, respectivamente, maiores ao T5 que foi de 69,40%. Houve comportamento linear no ICS pelas planas de soja, sendo que aos 23 DAS os ICS eram próximos entre os tratamentos, porém os tratamentos T1 e T3 apresentaram crescimento mais acentuados da parte vegetativa aérea quando comparado ao tratamento T5 (Figura 15).

Os resultados obtidos estão de acordo com os encontrados por Barzotto et al. (2016) e Oliveira et al. (2021) observaram que o IAF da cultura da soja é superior em plantas que passam por um menor estresse hídrico quando comparado a plantas com restrição de água.

5.5. FENOLOGIA DA CULTURA DA SOJA

5.5.1 Fenologia da cultura da soja sob diferentes lâminas de irrigação aplicadas por microaspersão no ano de 2019, ciclo C1.

Na Tabela 6 estão apresentados os dados de análise de variância de produtividade e componentes de rendimento da cultura da soja cultivada no ano de 2019 utilizando diferentes lâminas de irrigação. As lâminas de irrigação aplicadas influenciaram significativamente nas variáveis peso de mil sementes (PMS), altura de planta (AP), e produtividade (Prod.).

TABELA 6. Análise de variância do peso de mil sementes (PMS), número de nós por planta (NNp), número de vagem por planta (NVp), altura de planta (AP) e produtividade (Prod) da cultura da soja sob diferentes lâminas de irrigação aplicadas por microaspersão no ano de 2019, ciclo C1.

Fator de variação	Peso de mil sementes (PMS)				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	675,99	169,00	5,2521	0,011080*
Bloco	3	420,88	140,29	4,3650	0,026902*
Resíduo	12	385,69	32,14		
Total	19	1482,55			
CV	3,56%				
Média geral (g)	159,22				
Fator de variação	Número de nós por planta (NNp)				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	8,872	2,21800	1,45602	0,27569
Bloco	3	1,190	0,39667	0,26039	0,85254
Resíduo	12	18,280	1,52333		
Total	19	28,342			
CV	31,09%				
Média geral	3,97				
Fator de variação	Número de vagens por planta (NVp)				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	1169,4	292,36	2,8344	0,072354
Bloco	3	783,6	261,19	2,5322	0,106261
Resíduo	12	1237,8	103,15		
Total	19	3190,8			
CV	25,34%				
Média geral	40,08				

Continuação...

Fator de variação	Altura de planta (AP)				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	3490,7	872,68	48,037	0,000000**
Bloco	3	144,0	48,01	2,642	0,097007
Resíduo	12	218,0	18,17		
Total	19	3852,8			
CV	6,63%				
Média geral (cm)	64,28				
Fator de variação	Produtividade (Prod)				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	3523876	880969	3,2970	0,048427*
Bloco	3	1362974	454325	1,7003	0,219844
Resíduo	12	3206460	867205		
Total	19	8093310			
CV	17,54%				
Média geral (kg ha ⁻¹)	2946,84				

Legenda: GL: grau de liberdade, SQ: soma de quadrados, QM: quadrado médio, Fc: valor de F calculado, Pr>Fc: Probabilidade do F calculado ser maior que F tabelado.

Observa-se que o peso de mil sementes, usando a microaspersão (C1), oscilou entre os diferentes percentuais de água no solo, variando de 151,2 g (T2) até 169,0 (T5), variação de 18,5% e sendo que estes diferiram entre si. O ajuste com polinômio de segundo grau resultou em R^2 de 70,98%, indicando dispersão dos dados obtidos. Constata-se ainda que a redução das lâminas de irrigação não reduziu o peso das sementes de maneira uniforme entre os percentuais de água no solo, sendo que, em valor número, reduziu de T1 para T4, mas aumentou em T5 (Figura 17). Este comportamento pode estar associado a precipitação natural que ocorreu ao longo do ciclo, interferindo no possível efeito das lâminas de irrigação. Portanto, a repetição do experimento em épocas sem precipitação natural ou em ambiente protegido, poderia resultar em comportamento diferente do peso das sementes.

Em relação ao peso de mil sementes, os valores obtidos diferem dos observados por Silva et al. (2020). Segundo esses autores o déficit hídrico diminui a massa de grão, mesmo que essa característica seja determinada geneticamente. De acordo com Corrêa et al. (2019) o uso da irrigação promoveu um ganho de 20 g no peso de mil sementes em relação ao cultivo sem irrigação.

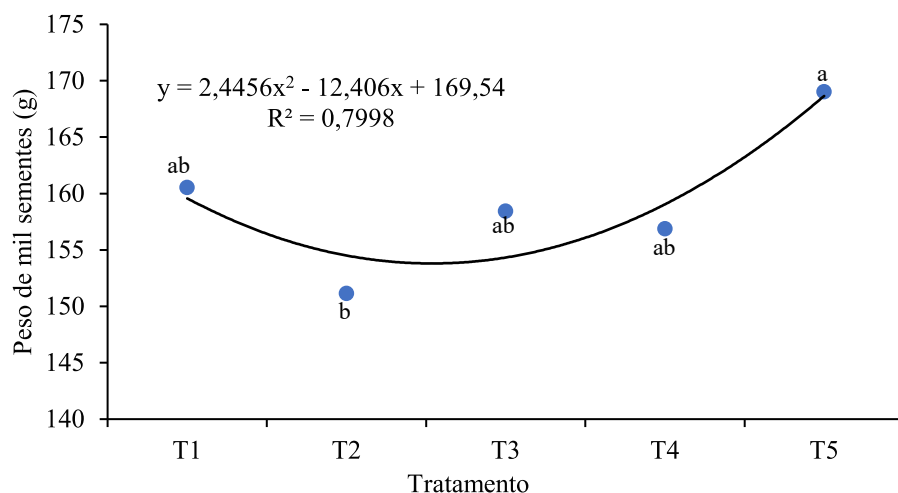


FIGURA 17. Peso de mil sementes usando a microaspersão no ciclo C1 para as lâminas de irrigação suficiente para elevar a umidade do solo à 1,0 (T1), 0,8 (T2), 0,6 (T3), 0,4 (T4) e 0,2 (T5) da capacidade total de água no solo (CTA). Letras minúsculas iguais entre os tratamentos não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Observa-se que o NNos, usando a microaspersão (C1), apresentou apenas diminuição em valor numérico de T1 em direção a T5, variando de 4,4 (T1) até 3,2 (T5), variação de 37,5%. O ajuste com polinômio de segundo grau resultou em R^2 de 48,98%, indicando grande dispersão dos dados obtidos, motivo pelo favoreceu a não existência de diferença significativa entre os percentuais de água no solo (Figura 18).

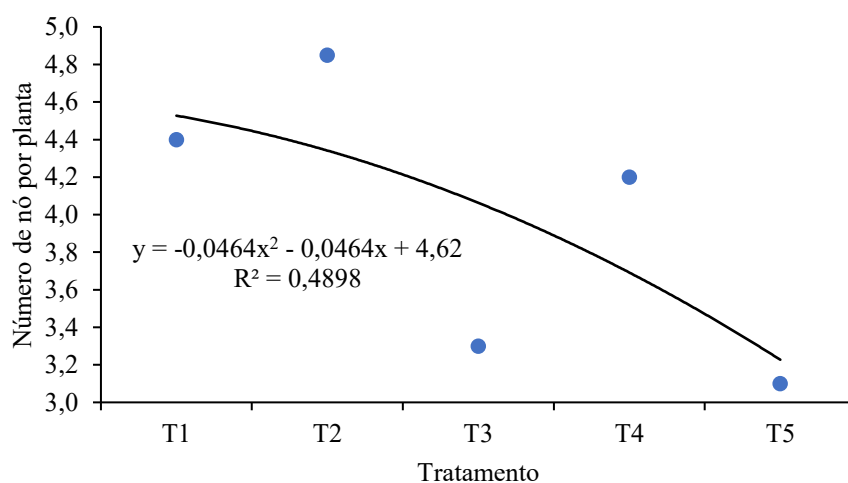


FIGURA 18. Valores do número de nós por planta (NNos) usando a microaspersão no ciclo C1 para as lâminas de irrigação suficiente para elevar a umidade do solo à 1,0 (T1), 0,8 (T2), 0,6 (T3), 0,4 (T4) e 0,2 (T5) da capacidade total de água no solo (CTA).

Observa-se que o número de vagem por planta, usando a microaspersão (C1), apresentou grande oscilação entre os percentuais de água no solo, sendo o maior valor e T2 (39,4) e o menor em T5 (31,55), variação de 37,5, que pode estar associado a fatores não controláveis no local onde o experimento foi instalado. O ajuste com polinômio de segundo grau resultou em R^2 de 30,73%, indicando média dispersão dos dados obtidos, motivo pelo qual auxiliou pela não diferença significativa entre os percentuais de água no solo. Mesmo com a dispersão dos dados, considerando a curva de ajuste houve, em valor numérico, redução de T1 em direção a T5 (Figura 19).

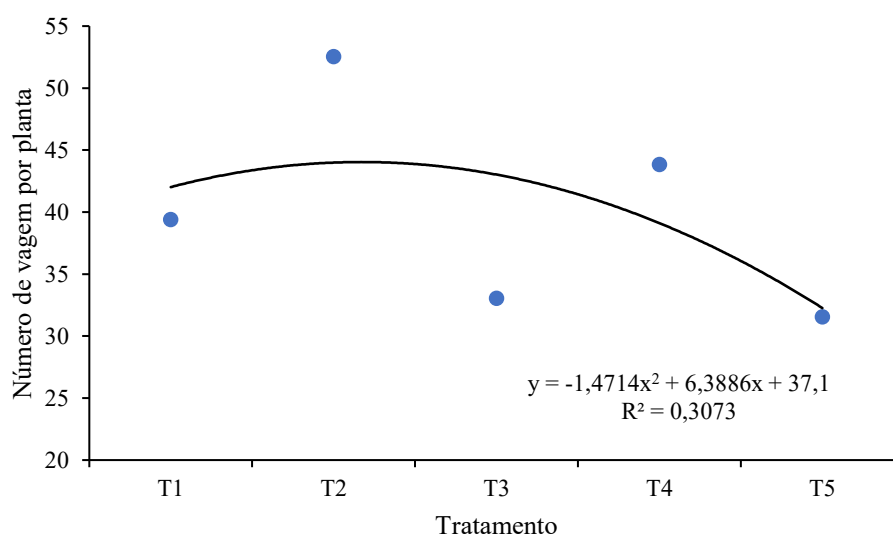


FIGURA 19. Número de vagem por planta usando a microaspersão no ciclo C1 para as lâminas de irrigação suficiente para elevar a umidade do solo à 1,0 (T1), 0,8 (T2), 0,6 (T3), 0,4 (T4) e 0,2 (T5) da capacidade total de água no solo (CTA).

Ao contrário dos atributos anteriores, observa-se que a altura das plantas (AP), usando a microaspersão (C1), apresentou evidente redução com a diminuição dos percentuais de água no solo, sendo o maior valor e T1 (82,20 cm) e o menor em T5 (46,25 cm), variação de 77,72%, evidenciando ao mesmo tempo o ajuste linear o que resultou em R^2 de 94,06%, indicando baixíssima dispersão dos dados obtidos. Assim observa-se que a AP em T1 e T2 foram maiores que T3, T4 e T5, e este último diferente de todos os demais percentuais de água no solo (Figura 20).

Esses valores concordam com o observado por Barzotto et al. (2016) que também constataram que o aumento da lâmina de irrigação influenciou positivamente na AP da soja. Resultado semelhante foi observado por Oliveira et al. (2021) que demonstraram

que a irrigação suplementar na cultura da soja proporcionou incrementos no desenvolvimento da cultura, e por consequente, na AP.

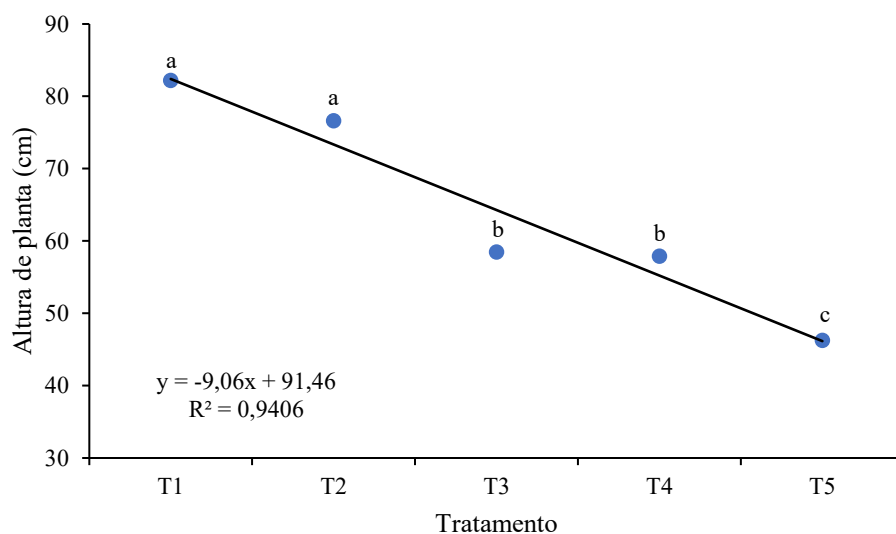


FIGURA 20. Altura das plantas de soja usando a microaspersão no ciclo C1 para as lâminas de irrigação suficiente para elevar a umidade do solo à 1,0 (T1), 0,8 (T2), 0,6 (T3), 0,4 (T4) e 0,2 (T5) da capacidade total de água no solo (CTA). Letras minúsculas iguais entre os tratamentos não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A produtividade (Prod) usando a microaspersão (C1), apresentou evidente redução com a diminuição dos percentuais de água no solo, sendo o maior valor em T2 (3472,3 kg ha⁻¹) e o menor em T5 (2237,0 kg ha⁻¹), diferindo entre si, e variação de 55,20%, e ajuste com polinômio de segundo grau que resultou em R² de 95,21% (Figura 20). Resultados semelhantes foram observados por Correa et al. (2019), ao constar incremento da produtividade proporcionado pelo uso da irrigação. Segundo Barbosa et al. (2020), o déficit hídrico é prejudicial ao rendimento de grãos da soja devido alterações fisiológicas, como fechamento estomático, causando queda nas flores, e por consequência, menor rendimento da cultura.

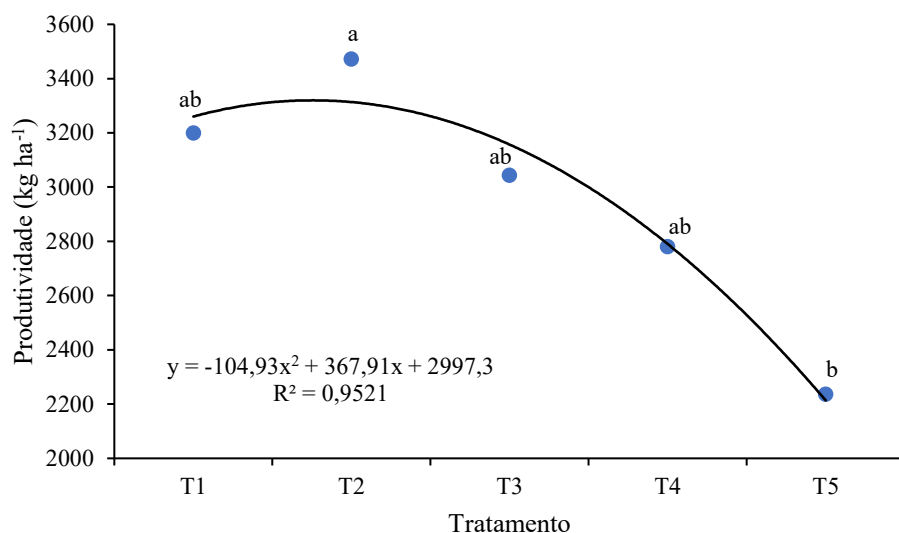


FIGURA 21. Produtividade da soja usando a microaspersão no ciclo C1 para as lâminas de irrigação suficiente para elevar a umidade do solo à 1,0 (T1), 0,8 (T2), 0,6 (T3), 0,4 (T4) e 0,2 (T5) da capacidade total de água no solo (CTA). Letras minúsculas iguais entre os tratamentos não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

5.5.2 Fenologia da cultura da soja sob diferentes lâminas de irrigação aplicadas por microaspersão no ano de 2020, ciclo 2 (C2)

Na Tabela 7 estão apresentados os dados de produtividade e seus componentes de rendimento da cultura da soja cultivada no ano de 2020 (C2) utilizando diferentes lâminas de irrigação. As lâminas de irrigação interferiram significativamente no comprimento de vargem (CVa), altura de planta (AP), número total de sementes por planta (N_{Te}), sementes viáveis por planta (SV_i), número de vargem por planta (NVa), peso seco do caule (PSc), peso seco de mil sementes (PMS) e na profundidade de raiz (Pra).

TABELA 7. Análise de variância do Comprimento da vagem (CVa), Diâmetro das sementes (DSe), Altura da Planta (AP), Número total de sementes por planta (NTe), Sementes viáveis por planta (SVi), Número de nós por planta (NNos), Semente abortada por planta (SAp), Número de vagens por planta (NVa), Peso seco da haste (PSh), Peso seco da vagem (PsV), Produtividade (Prod), Peso de mil sementes (PMS) e Profundidade de raiz (PRa) da cultura da soja sob diferentes lâminas de irrigação aplicadas por microaspersão no ano de 2020, ciclo C2.

Fator de variação	Comprimento da vagem (CVa)				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	0,12617	0,0315425	10,2328	0,00077
Bloco	3	0,00796	0,0026533	0,8608	0,48780
Resíduo	12	0,03699	0,0030825		
Total	19	0,17112			
CV	1,24%				
Média geral (cm)	4,516				
Fator de variação	Diâmetro das sementes (DSe)				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	0,078870	0,0197175	2,84764	0,07150
Bloco	3	0,005335	0,0017783	0,25683	0,85504
Resíduo	12	0,083090	0,0069242		
Total	19	0,162795			
CV	1,33%				
Média geral (mm)	6,271				
Fator de variação	Altura da Planta (AP)				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	899,53	224,882	54,798	0,00000
Bloco	3	9,48	3,161	0,770	0,53252
Resíduo	12	49,25	4,104		
Total	19	958,26			
CV	1,94%				
Média geral (cm)	104,308				
Fator de variação	Número total de sementes por planta (NTs)				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	39,099	9,7747	17,2611	0,00006
Bloco	3	0,166	0,0553	0,0976	0,95987
Resíduo	12	6,795	0,5663		
Total	19	46,060			
CV	1,21%				
Média geral	62,304				
Fator de variação	Semente abortada por planta (SAp)				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	16,571	4,1428	3,4689	0,041955
Bloco	3	6,638	2,2127	1,8526	0,191409
Resíduo	12	14,331	1,1942		
Total	19	37,540			
CV	16,28%				
Média geral	6,714				

Continuação...

		Sementes viáveis por planta (SVp)				
Fator de variação	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc	
Tratamento	4	86,117	21,5293	11,3823	0,000473	
Bloco	3	8,872	2,9573	1,5635	0,249395	
Resíduo	12	22,698	1,8915			
Total	19	117,687				
CV	2,47%					
Média geral	55,420					
		Número de nós por planta (NNp)				
Fator de variação	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc	
Tratamento	4	7,787	1,9467	0,84216	0,52463	
Bloco	3	4,882	1,6274	0,70400	0,56771	
Resíduo	12	27,739	2,3116			
Total	19	40,408				
CV	7,64%					
Média geral	19,903					
		Número de vagens por planta (NVp)				
Fator de variação	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc	
Tratamento	4	921,60	230,401	22,0031	0,00002	
Bloco	3	37,99	12,662	1,2092	0,34848	
Resíduo	12	125,66	10,471			
Total	19	185,25				
CV	6,01%					
Média geral	55,198					
		Peso seco da haste (PSh)				
Fator de variação	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc	
Tratamento	4	2948,6	737,14	8,6564	0,00159	
Bloco	3	44,8	14,93	0,1754	0,91101	
Resíduo	12	1021,9	85,16			
Total	19	4015,2				
CV	16,72%					
Média geral (g)	55,198					
		Peso seco da vagem (PSv)				
Fator de variação	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc	
Tratamento	4	5727,4	1431,85	2,46719	0,10121	
Bloco	3	14,4	4,80	0,00827	0,99891	
Resíduo	12	6964,3	580,36			
Total	19	12706,1				
CV	27,88%					
Média geral (g)	91,001					
		Produtividade (Prod.)				
Fator de variação	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc	
Tratamento	4	655205	163801	1,3401	0,31115	
Bloco	3	2201	734	0,0060	0,99932	
Resíduo	12	1466750	122229			
Total	19	2124156				
CV	9,79%					
Média geral (t ha ⁻¹)	3,569					

Continuação...

Fator de variação	Peso de mil sementes (PMS)				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	1309,96	327,94	26,3704	0,00001
Bloco	3	36,52	12,17	0,9803	0,43444
Resíduo	12	149,03	12,42		
Total	19	1495,50			
CV	2,33%				
Média geral (g)	151,410				
Fator de variação	Profundidade de raiz (Pra)				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	63,995	15,9987	4,2997	0,021874
Bloco	3	59,637	19,8791	5,3426	0,014360
Resíduo	12	4,651	3,7209		
Total	19	168,283			
CV	9,73%				
Média geral (cm)	19,815				

Legenda: GL: grau de liberdade, SQ: soma de quadrados, QM: quadrado médio, Fc: valor de F calculado, Pr>Fc: Probabilidade do F calculado ser maior que F tabelado.

Para a variável comprimento de vargem (CVa), o tratamento M5C2 (T5) apresentou o menor valor, 4,33 cm, quando comparado ao demais tratamentos utilizados, por outro lado, o tratamento M3C2 (T3) apresentou o maior CVa, 4,72 cm, não diferindo dos tratamentos M1C2 (T1), 4,58 cm; M2C2 (T2), 4,45 cm; e M4C2 (T4), 4,47 cm (Figura 22).

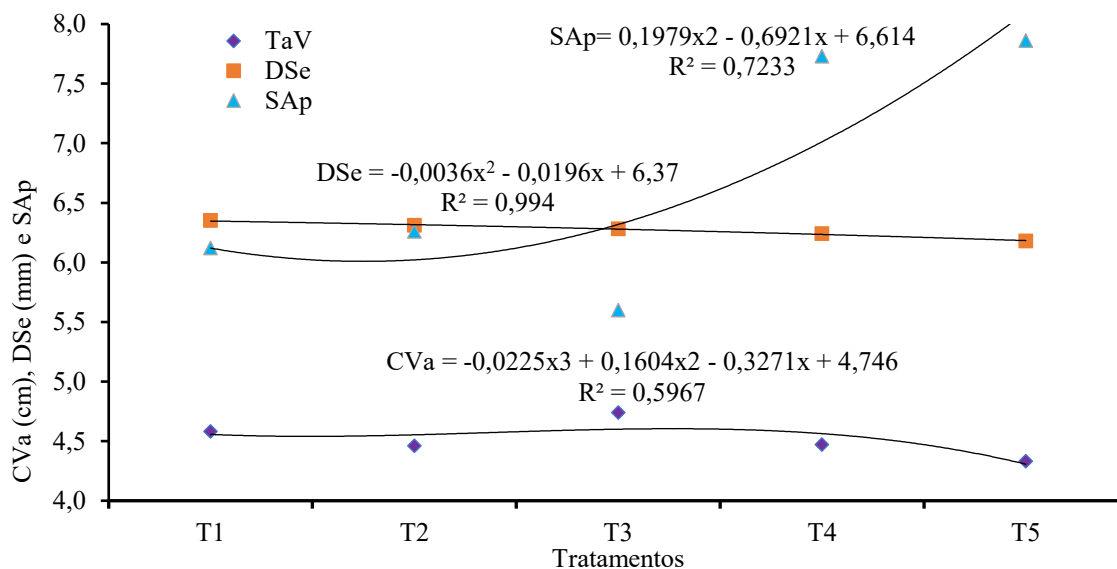


FIGURA 22. Comprimento da vargem (CVa), Diâmetro das sementes (DSe) e Semente abortada por planta (SAp) da cultura da soja irrigada por microaspersão no ano de 2020, ciclo 2 (C2) em função do fator de depleção de água no solo de 0,1 (T1), 0,2 (T2), 0,3 (T3), 0,5 (T4) e 0,7 (T5).

Quanto ao número total de sementes produzidos por planta (TSe), a maior quantidade foi no tratamento M1C2 (T1), que produziu em média 64,12 sementes por planta, diferindo significativamente dos valores obtidos nos tratamentos T3, 62,13; T4, 62,39 sementes por planta. A maior diferença encontrada para o TSe foi em relação ao tratamento T5, que produziu 59,87 sementes por planta (Figura 23). Resultado semelhante foi encontrado por Barbosa et al. (2020), ao constatar que plantas que receberam uma lâmina de irrigação equivalente à 100% da ETo apresentou uma quantidade superior a quantidade observada em plantas de soja que receberam lâmina de irrigação correspondente a 50% da ETo. Esses mesmos autores relatam que a redução no número de sementes de soja produzido pode estar relacionada ao abortamento de flores causado pelo estresse hídrico sofrido pelas plantas no momento da floração.

Na Figura 22 estão apresentados os valores do número de sementes viáveis por planta (SVi), onde o tratamento T1 apresentou maior valor quando comparado com os demais tratamentos, 58,02 sementes por planta. Esse valor diferiu significativamente dos valores encontrados no T4, 54,69 e do T5, que obteve a menor quantidade entre os tratamentos propostos, 52,06 sementes por planta. Por outro lado, o resultado obtido no presente estudo diverge da resposta alcançada por Gava et al. (2016), que não evidenciaram diferenças significativas de sementes abortadas de soja, e por consequência, no número de sementes viáveis de soja submetida a diferentes regimes hídricos.

O número médio de vagens produzidos por planta (NVa) foi diferente entre os tratamentos T3, T2, T1 e T5. O tratamento T3 apresentou o maior NVa, com o número médio de 62,5 vagens, já o tratamento T1 apresentou 53,4 vagens, valor próximo do valor ao obtidos em T2, 49,26 vagens. O menor NVa foi obtido no tratamento T5 que produziu 44,02 vagens por planta. Essa frutificação foi de cerca de 30% menor quando comparado ao tratamento T3 (Figura 23). Silva et al. (2020) confirma que a menor produção de vagens de soja s em sequeiro em comparação ao cultivo irrigado é pelo fato de um maior abortamento de flores e vagens proporcionado pelo déficit hídrico.

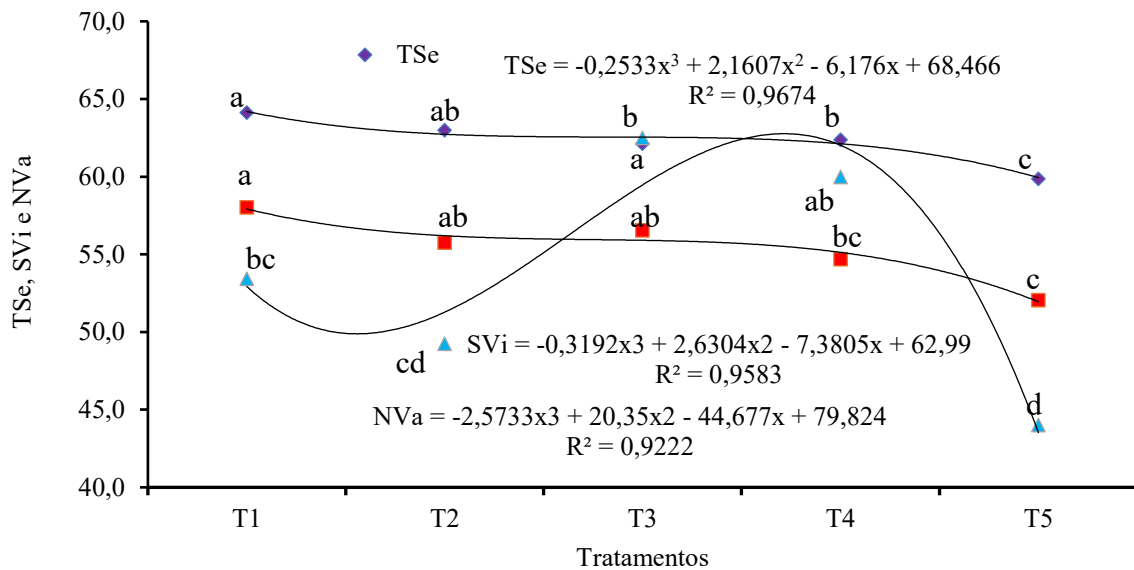


FIGURA 23. Valores de Total de sementes por planta (TSe); Sementes viáveis por planta (SVi) e Número de vagens por planta (NVa), com microaspersão, ciclo C2, em função do fator de depleção de água no solo de 0,1 (T1), 0,2 (T2), 0,3 (T3), 0,5 (T4) e 0,7 (T5). Letras minúsculas iguais entre os tratamentos não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Não foi observado diferença significativa no NNos e Pra em função do fator de depleção de água no solo (f) de 0,1, 0,2, 0,3, 0,5 e 0,7 no cultivo da soja. Observa-se que o NNos por planta, em valor numérico tendeu a uma leve redução com f (21 nos) de 0,1 em direção ao f de 0,7 (19,53 nos), redução de 5,50%. E, utilizando um polinômio de terceiro grau, o R^2 foi de 87,71%. A pra, por sua vez, apresentou valor pouco superior a 20 nos em T1 T2, T4 e T5, já em T3 redução para cerca de 16 nos (Figura 24).

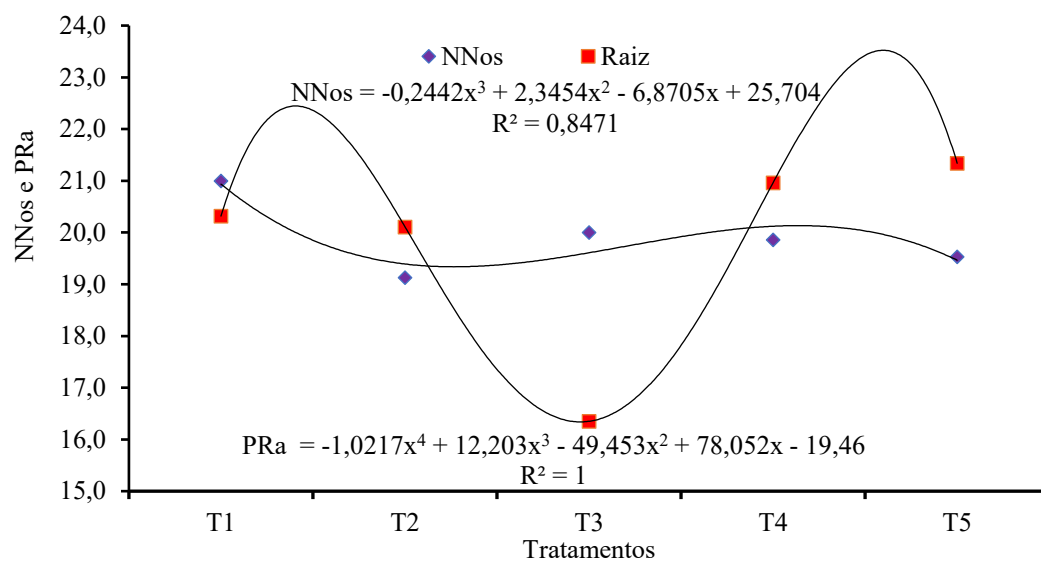


FIGURA 24. Valores do Número de nós por planta (NNos) e Profundidade das raízes (cm) (Pra), com microaspersão, ciclo C2, em função do fator de depleção de água no solo de 0,1 (T1), 0,2 (T2), 0,3 (T3), 0,5 (T4) e 0,7 (T5).

A AP submetidas ao tratamento T3 apresentou o maior tamanho, 111,36 cm, sendo maior que a T2, com plantas apresentando AP de 102,02 cm; T4, com 106,13 cm e T5, com menor valor (92,50 cm) (Figura 25). Esses valores concordam com os observados por Barzotto et al. (2016), onde constataram que o aumento da lâmina de irrigação influenciou positivamente na AP de soja. Resultado semelhante foi observado por Oliveira et al. (2022) que demonstraram que a irrigação suplementar na cultura da soja proporcionou incrementos no desenvolvimento da cultura, e por consequente, na altura da planta.

A AP foi maior nos tratamentos T1 (109,53 cm) e T3 (11,37 cm) em relação a T2 (102,02 cm) e T5 (92,03 cm), sendo este último menor em relação aos demais tratamentos, ou seja, redução de 19,02% de T1 para T5 ou 17,51 cm, sendo para ajuste com polinômio de segundo grau o valor de $R^2 = 91,00\%$ (Figura 25).

O peso médio de mil grãos (PMG) de soja em T1 apresentou o valor, 163,02 g, maior em relação a todos os demais tratamentos (T2, 151,23 g; T3, 154,63 g; e T4, 150,20 g; T5, 135,97 g), sendo T2, T3 e T4 iguais e T5 significativamente menor aos demais tratamentos. O PMG diminuiu de T1 para T5 em 19,85%, ou seja, redução de 27,05 g, sendo que com polinômio de segundo grau o ajuste foi excelente ($R^2 = 97,68\%$) (Figura 25). Estes valores diferem dos observados por Silva et al. (2020) que ao usarem déficit hídrico no cultivo da soja, houve diminuição da massa de grão, mesmo que essa

característica seja, em grande medida, influenciada pela variedade genética. De acordo com Corrêa et al. (2019) o uso da irrigação promoveu um ganho de 20 g no peso de mil sementes em relação ao cultivo sem irrigação.

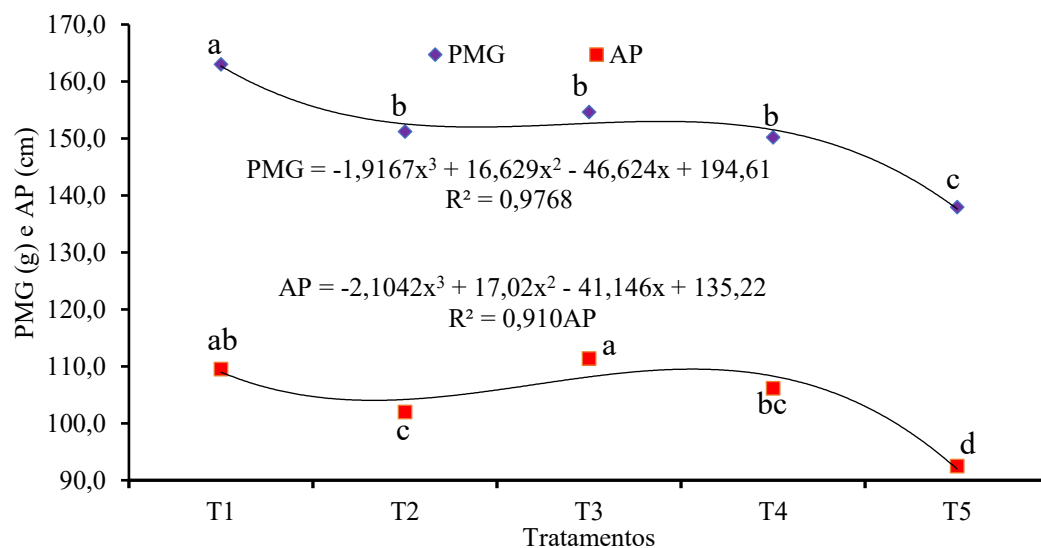


FIGURA 25. Valores de Altura das plantas (cm) (AP) e Peso de mil grãos de soja (g) (PMG), com microaspersão, ciclo C2, em função do fator de depleção de água no solo de 0,1 (T1), 0,2 (T2), 0,3 (T3), 0,5 (T4) e 0,7 (T5). Letras minúsculas iguais entre os tratamentos não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A produtividade foi maior no T1, chegando a $3,87 \text{ t ha}^{-1}$. Porém não houve uma tendência de redução progressiva numericamente da produtividade em função das lâminas de irrigação, pois em T2 foi menor que T3 e T4 mesmo que em valor numérico, porém esses três tratamentos foram iguais estatisticamente entre si e em relação a T1, mas todos diferindo de T5, em que a produtividade foi de $3,34 \text{ t ha}^{-1}$ (Figura 26), ou seja, redução de 15,87% entre T1 e T5 ou $0,53 \text{ t ha}^{-1}$,

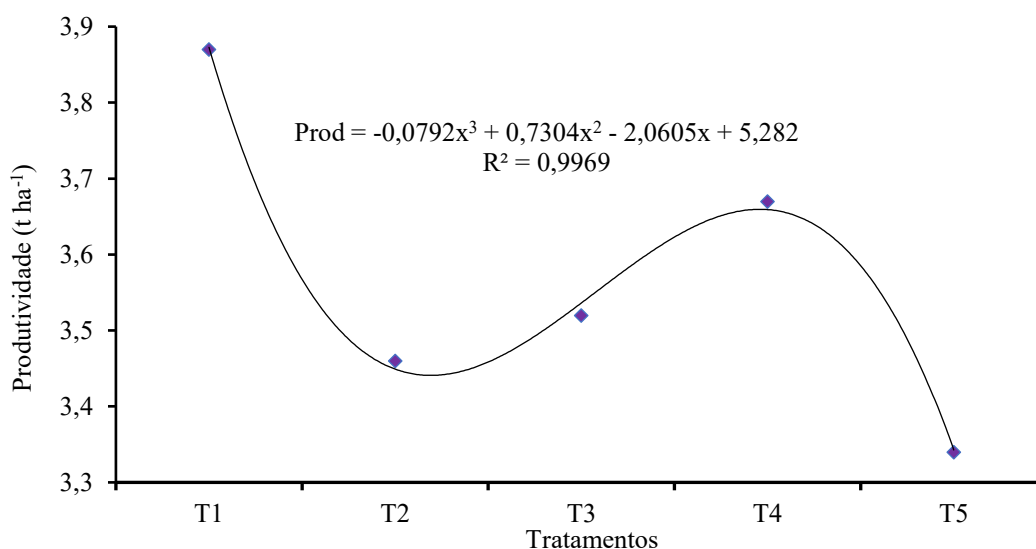


FIGURA 26. Valores de Produtividade (t ha⁻¹), com microaspersão, ciclo C2, em função do fator de depleção de água no solo de 0,1 (T1), 0,2 (T2), 0,3 (T3), 0,5 (T4) e 0,7 (T5).

5.5.2 Fenologia da cultura da soja sob diferentes lâminas de irrigação aplicadas por gotejamento subsuperficial no ano de 2020

O resultado da análise de variância das variáveis fenológicas analisadas da cultura da soja submetida a diferentes níveis de estresse hídrico e irrigada por gotejamento subsuperficial apresentou diferença significativa apenas para o peso de mil grãos (PMG) (Tabela 8).

TABELA 8. Análise de variância do Peso de mil grãos (PMG), comprimento de raiz (CR), e produtividade (Prod) da cultura da soja sob diferentes períodos de estresse hídrico irrigada por gotejamento subsuperficial no ano de 2020.

Fator de variação	Peso de mil grãos (PMG)				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	1180,02	295,005	15,9773	0,0006978**
Bloco	3	217,17	108,584	5,8808	0,0268573**
Resíduo	12	147,71	147,71		
Total	19	1544,90	1544,90		
CV	2,96%				
Média geral (g)	145,10				
Fator de variação	Comprimento de raiz (CR)				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	48,030	12,0075	2,1514	0,165540
Bloco	3	59,637	29,8186	5,3426	0,033602
Resíduo	12	44,650	5,5813		
Total	19	152,318			
CV	23,27%				
Média geral (cm)	19,95				

Continuação...

Fator de variação	Produtividade (Prod)				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	1765794	441449	3,05649	0,08365
Bloco	3	19143	9571	0,06627	0,93639
Resíduo	12	1155440	144430		
Total	19	2940376			
CV	9,66%				
Média geral (kg ha ⁻¹)	3935,07				

Legenda: GL: grau de liberdade, SQ: soma de quadrados, QM: quadrado médio, Fc: valor de F calculado, Pr>Fc: Probabilidade do F calculado ser maior que F tabelado.

Observa-se que o PMG da soja submetida a diferentes estresses hídrico, o tratamento T2 apresentou 156,40 g diferindo significativamente dos tratamentos T1, 141,33 g; T4, 133,83 g e T5, 139,30 g, ou seja, T2 foi 16,86% superior ao T4, ganho de 22,57 g (Figura 27), embora, de maneira geral, considerando o ajuste polinomial houve decaimento do PMG com ampliação do período com restrição de irrigação. Usando polinômio de segundo grau o valor de R² foi de apenas 44,57%, demonstrando a variabilidade das medias entre os tratamentos, que pode ser devido a fatores desconhecidos, alheios aos procedimentos metodológicos apresentados. Um fator que pode ter contribuído foi a precipitação natural que ocorreu, especialmente nos estádios finais do ciclo de cultivo. Estes valores diferem dos observados por Silva et al. (2020) que ao usarem déficit hídrico houve diminui a massa de grão, mesmo que essa característica seja bastante influenciada pela variedade genética. De acordo com Corrêa et al. (2019) o uso da irrigação promoveu um ganho de 20 g no PMG em relação ao cultivo sem irrigação.

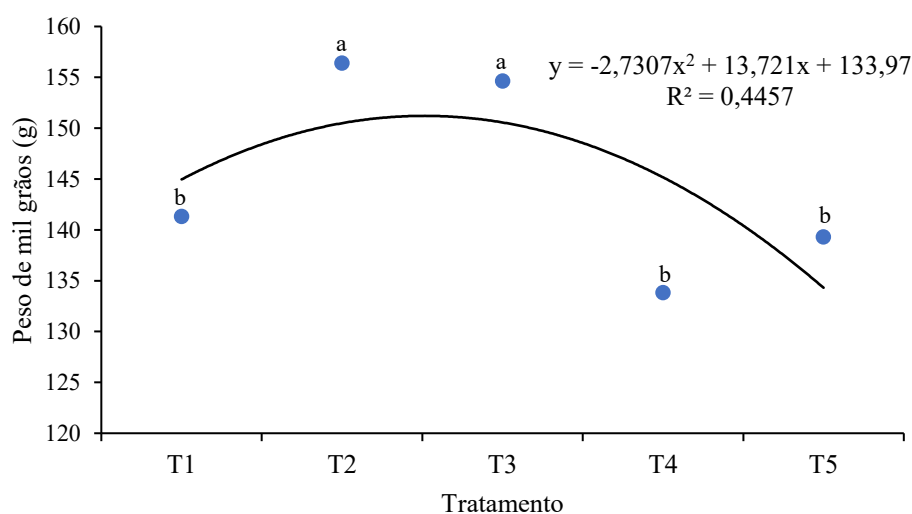


FIGURA 27. Peso de mil grãos usando o gotejamento subsuperficial para diferentes períodos de estresse hídrico no solo, sendo GS1 (7 dias sem irrigação), GS2 (14 dias sem irrigação), GS3 (21 dias sem irrigação), GS4 (30 dias sem irrigação) e GS5 (sem irrigação durante todo o ciclo da soja), respectivamente identificados como T1, T2, T3, T4 e T5. Letras minúsculas iguais entre os tratamentos não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Não houve diferença significativa no CR usando o gotejamento subsuperficial para diferentes períodos de estresse hídrico no solo da soja, onde observa-se oscilação entre os valores médios, sendo o maior valor numérico de 20,66 cm em T5 e o menor de 19,00 cm em T2, o que corresponde a variação de 8,71%, que pode ser atribuído, em parte, à própria variabilidade espacial na estrutura e compactação do solo, influenciando na distribuição das raízes entre os tratamentos (Figura 28).

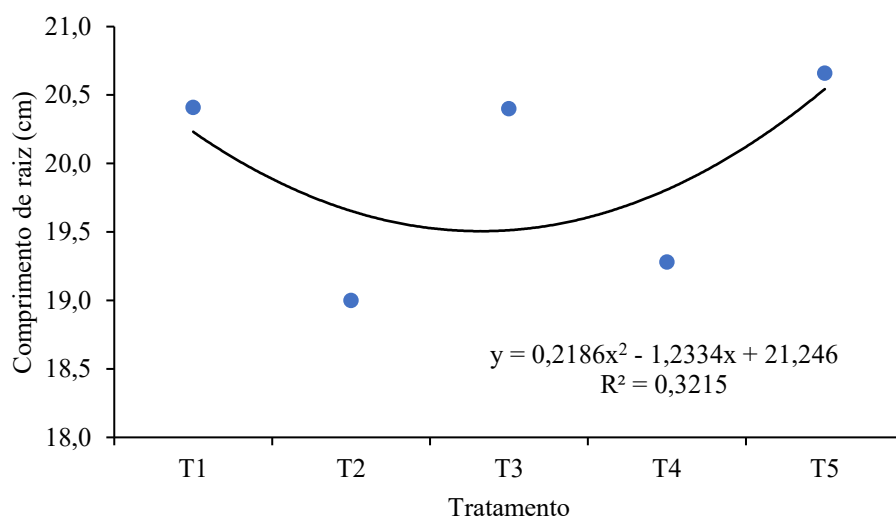


FIGURA 28. Comprimento de raiz (CR) usando o gotejamento subsuperficial para diferentes períodos de estresse hídrico no solo, sendo GS1 (7 dias sem irrigação), GS2 (14 dias sem irrigação), GS3 (21 dias sem irrigação), GS4 (30 dias sem irrigação) e GS5 (sem irrigação durante todo o ciclo da soja), respectivamente identificados como T1, T2, T3, T4 e T5.

A produtividade (Prod) usando o gotejamento subsuperficial não apresentou variação em função de diferentes períodos de estresse hídrico no solo (7, 14, 21, 30 dias sem irrigação e permanentemente sem irrigação), sendo o maior valor foi de 4289,2 kg

ha⁻¹ obtido com período sem irrigação de 14 dias (T2). Com ajuste com polinômio de segundo grau que resultou em R² de 62,21%, e, a partir da curva ajustada, observa-se que a prod. máxima foi atingida entre 23 e 26 dias de estresse hídrico (Figura 29).

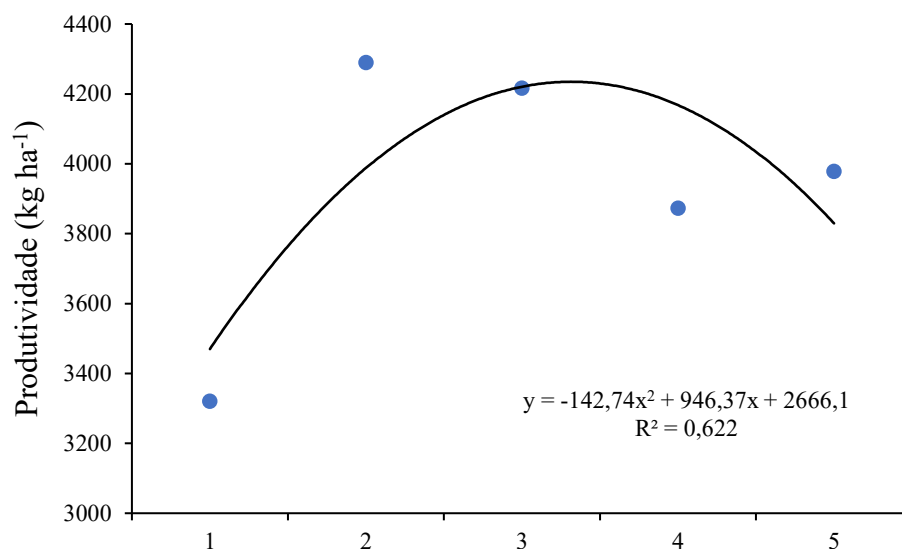


FIGURA 29. Produtividade da soja usando o gotejamento subsuperficial para diferentes períodos de estresse hídrico no solo, sendo GS1 (T1) (7 dias sem irrigação), GS2 (T2) (14 dias sem irrigação), GS3 (T3) (21 dias sem irrigação), GS4 (T4) (30 dias sem irrigação) e GS5 (T5) (sem irrigação durante todo o ciclo da soja), respectivamente identificados como T1, T2, T3, T4 e T5.

5.6 ÍNDICE SPAD DA CULTURA DA SOJA

5.6.1 índice SPAD da cultura da soja irrigada por microaspersão no ano de 2019, ciclo 1 (C1)

A análise de variância do índice SPAD da cultura da soja irrigada por microaspersão no ciclo C1, para as lâminas de irrigação suficiente para elevar a umidade do solo à 1,0, 0,8, 0,6, 0,4 e 0,2 da capacidade total de água no solo (CTA), respectivamente identificados como T1, T2, T3, T4 e T5 é apresentado na (Tabela 9). Observa-se que o CV do índice SPAD foi baixo em todas os DAS, chegando ao máximo de 7,54% aos 80 DAS.

TABELA 9. Análise de variância do índice SPAD em diferentes DAS da cultura da soja irrigada com lâminas de irrigação suficiente para elevar a umidade do solo à 1,0, 0,8, 0,6, 0,4 e 0,2 da capacidade total de água no solo aplicadas por microaspersão no ano de 2019 (C1).

Fator de variação	62 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	9,1197	2,27993	2,14301	0,13788
Bloco	3	2,2363	0,74544	0,70067	0,56953
Resíduo	12	12,7667	1,06389		
Total	19	24,1227			
CV	2,36%				
Média geral	43,80				

Fator de variação	69 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	61,075	15,2687	3,3693	0,045574
Bloco	3	54,836	18,2788	4,0335	0,033786
Resíduo	12	54,380	4,5317		
Total	19	170,929			
CV	5,03%				
Média geral	35,81				

Fator de variação	80 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	77,093	19,2733	1,95176	0,16640
Bloco	3	2,693	0,8975	0,09089	0,96366
Resíduo	12	118,498	9,8748		
Total	19	198,283			
CV	7,54%				
Média geral	41,70				

Fatores de variação	91 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	30,646	7,6614	1,7114	0,21193
Bloco	3	30,395	10,1318	2,2632	0,13340
Resíduo	12	53,720	4,4767		
Total	19	114,761			
CV	4,76%				
Média geral	44,40				

Fatores de variação	105 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	19,230	4,8075	3,13097	0,05578
Bloco	3	2,154	0,7179	0,46757	0,71034
Resíduo	12	18,425	1,5355		
Total	19	39,809			
CV	2,79%				
Média geral	44,39				

Continuação...

Fatores de variação	115 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	14,2526	3,5632	6,0501	0,006649
Bloco	3	3,5153	1,1718	1,9896	0,169384
Resíduo	12	7,0672	0,5889		
Total	19	24,8351			
CV	1,71%				
Média geral	44,83				
Fatores de variação	125 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	57,987	14,4967	14,9678	0,00013
Bloco	3	6,536	2,1786	2,2494	0,13499
Resíduo	12	11,622	0,9685		
Total	19	76,145			
CV	2,16%				
Média geral	45,47				
Fatores de variação	136 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	8,173	2,0432	1,0231	0,43429
Bloco	3	27,032	9,0107	4,5119	0,02438
Resíduo	12	23,965	1,9971		
Total	19	59,170			
CV	4,60%				
Média geral	30,71				

Legenda: GL: grau de liberdade, SQ: soma de quadrados, QM: quadrado médio, Fc: valor de F calculado, Pr>Fc: Probabilidade do F calculado ser maior que F tabelado.

O índice SPAD da cultura da soja submetida a diferentes lâminas de irrigação no ciclo C1, ano de 2019, apresentou diferenças significativas apenas aos 115 e 125 DAS, sendo menor no T2 em relação aos demais tratamentos (Figura 30). Em média, os valores do índice SPAD se mantiveram elevados durante todo o período de avaliação, 62, 69, 80, 91, 105, e 125 DAS. No final do ciclo da cultura, com a senescência das folhas, o valor médio do índice SPAD reduziu aos 136 DAS.

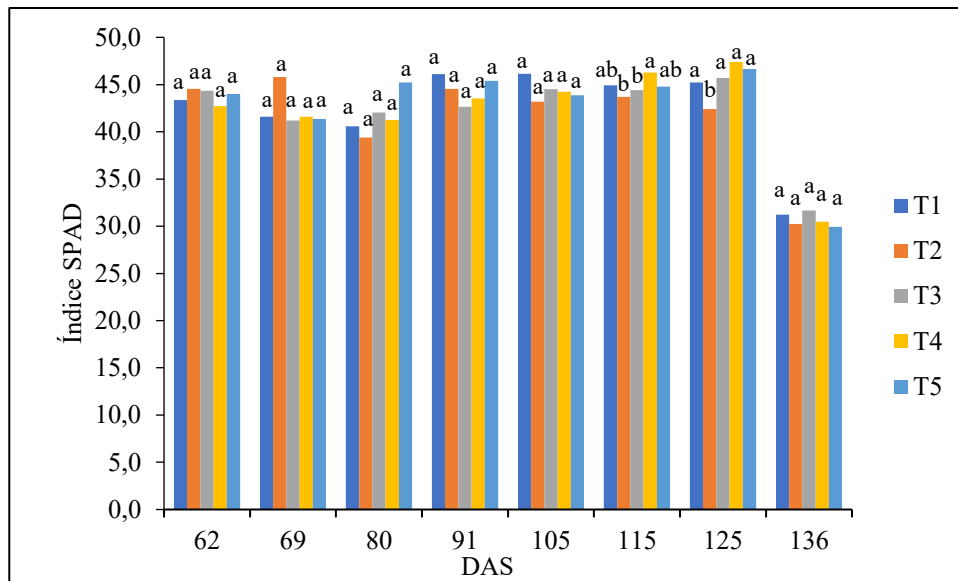


FIGURA 30. Índice SPAD da cultura da soja em diferentes DAS irrigada com lâminas de irrigação suficiente para elevar a umidade do solo à 1,0, 0,8, 0,6, 0,4 e 0,2 da capacidade total de água no solo, aplicadas por microaspersão no ano de 2019 (C1). Letras minúsculas iguais entre as diferentes lâminas de irrigação não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey dentro de cada DAS.

5.6.2 índices SPAD da cultura da soja irrigada por microaspersão no ano de 2020, ciclo 2 (C2).

A análise de variância do índice SPAD da cultura da soja submetida a diferentes lâminas de irrigação (fator de depleção de água no solo (f) de 0,1 (T1), 0,2 (T2), 0,3 (T3), 0,5 (T4) e 0,7 (T5)) por microaspersão, ciclo C2, no ano de 2020, é apresentado na Tabela 10).

TABELA 10. Análise de variância do índice SPAD da cultura da soja sob déficit hídrico corresponde ao fator de depleção de água no solo (f) de 0,1, 0,2, 0,3, 0,5 e 0,7, aplicadas por microaspersão no ciclo C2, no ano de 2020 para diferentes dias após a semeadura.

Fator de variação	27 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	50,489	12,6223	17,4430	0,00006
Bloco	3	1,079	0,3598	0,4971	0,96110
Resíduo	12	8,684	0,7236		
Total	19	60,252			
CV	2,16%				
Média geral	39,43				

Continuação...

Fator de variação	34 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	57,174	14,2935	9,5185	0,001054
Bloco	3	5,978	1,9926	1,3269	0,311434
Resíduo	12	18,020	1,5017		
Total	19	81,172			
CV	3,42%				
Média geral	35,81				

Fator de variação	41 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	76,147	19,0369	15,929	0,00010
Bloco	3	2,388	0,7859	0,666	0,58885
Resíduo	12	14,341	1,1951		
Total	19	92,877			
CV	2,83%				
Média geral	38,58				

Fatores de variação	48 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	54,728	13,6819	26,1438	0,0000076
Bloco	3	11,289	3,7620	7,1885	0,0050970
Resíduo	12	6,280	0,5233		
Total	19	72,293			
CV	1,86%				
Média geral	38,96				

Fatores de variação	55 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	19,903	4,9758	5,4656	0,00965
Bloco	3	1,060	0,3535	0,3883	0,76355
Resíduo	12	10,925	0,9104		
Total	19	31,888			
CV	2,60%				
Média geral	36,63				

Fatores de variação	62 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	36,108	9,0269	13,7925	0,00019
Bloco	3	1,709	0,5698	0,8707	0,48315
Resíduo	12	7,854	0,6445		
Total	19	45,671			
CV	2,15%				
Média geral	37,61				

Fatores de variação	69 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	31,984	7,9963	10,8137	0,000598
Bloco	3	6,071	2,0237	2,7368	0,089810
Resíduo	12	8,873	0,7394		
Total	19	46,928			
CV	2,03%				
Média geral	42,36				

Continuação...

Fatores de variação	76 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	2,0070	0,50175	2,5912	0,090209
Bloco	3	4,5263	1,50876	7,919	0,003761
Resíduo	12	2,3236	0,19363		
Total	19	8,8569			
CV	1,03%				
Média geral	42,89				

Fatores de variação	85 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	1,4293	0,35733	0,75282	0,5756
Bloco	3	0,8655	0,28850	0,60780	0,62257
Resíduo	12	5,6979	0,47466		
Total	19	7,9907			
CV	1,51%				
Média geral	45,53				

Fatores de variação	90 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	10,5784	2,64459	3,3696	0,04567
Bloco	3	2,6127	0,87088	1,1087	0,38372
Resíduo	12	9,4256	0,78547		
Total	19	22,6167			
CV	1,95%				
Média geral	45,34				

Continuação...

Fatores de variação	97 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	19,725	4,9313	4,9341	0,013826
Bloco	3	6,084	2,0281	2,0292	0,163547
Resíduo	12	11,993	0,9994		
Total	19	37,803			
CV	2,29%				
Média geral	43,67				

Fatores de variação	103 DAS				
	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	31,544	7,8860	2,0891	0,14532
Bloco	3	12,148	4,0493	1,0727	0,39728
Resíduo	12	45,297	3,7748		
Total	19	88,989			
CV	5,12%				
Média geral	37,93				

Legenda: GL: grau de liberdade, SQ: soma de quadrados, QM: quadrado médio, Fc: valor de F calculado, Pr>Fc: Probabilidade do F calculado ser maior que F tabelado.

O índice SPAD, em função das lâminas de irrigação na cultura da soja, apresentou os maiores valores no tratamento M5C2, desde os 27 DAS até os 62 DAS, diferindo significativamente dos demais tratamentos. Após 69 DAS, com a intensificação do

período chuvoso, não foi possível identificar diferenças significativas entre os tratamentos. Nesse período, o índice SPAD variou de 40 até 46 em todos os tratamentos. Com o final do ciclo, o índice SPAD decaiu para valores entre 36 e 39,70 para os tratamentos propostos. Essa redução dos valores do índice SPAD está relacionado à senescência da cultura (Figura 31).

Por outro lado, os tratamentos com maiores umidades no solo, M1C2, M2C2 e M3C2 apresentaram menores valores do índice SPAD dos 27 DAS até os 62 DAS. Esses valores diferem dos encontrados por Gonem (2024), onde plantas de soja sem estresse hídrico apresentam maiores valores do índice SPAD devido ao maior conteúdo de clorofila total na folha.

A microaspersão no ciclo C2, no ano de 2020, o déficit hídrico correspondente ao fator de depleção de água no solo (f) de 0,3 foi o que apresentou maiores valores do índice SPAD no período de 27 a 62 DAS. Sendo que o índice SPAD se elevou a partir de 62 DAS até 97 DAS, reduzindo aos 103 DAS em função do início da senescência das folhas, e com menores variações em relação ao período de 27 a 62 DAS (Figura 30).

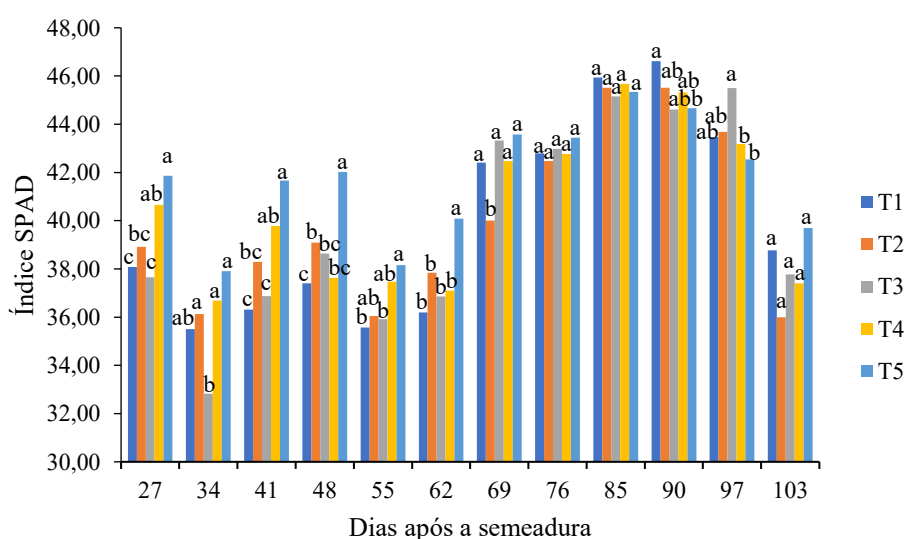


FIGURA 31. Índice SPAD da cultura da soja sob déficit hídrico corresponde ao fator de depleção de água no solo (f) de 0,1, 0,2, 0,3, 0,5 e 0,7, aplicadas por microaspersão no ciclo C2, no ano de 2020. Letras minúsculas iguais entre as diferentes lâminas de irrigação não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey dentro de cada DAS.

5.7 MODELO DE RITCHIE

A evaporação de água no solo nos dois primeiros dias após a última aplicação de água foi maior no solo descoberto (P0), quando comparado aos tratamentos com algum nível de palhada no solo. Já após o terceiro dia de avaliação, a evaporação do solo no P0 foi maior quando comparado com os níveis de palhada no solo, que está relacionado com o processo de secagem do solo ser facilitado quando da ausência de palhada (Figura 32). De acordo com Freitas et al. (2006) na fase inicial do processo de evaporação de água no solo, se dá unicamente em função da demanda evaporativa da atmosfera, e após esse período, a evaporação depende das características hidráulicas do solo.

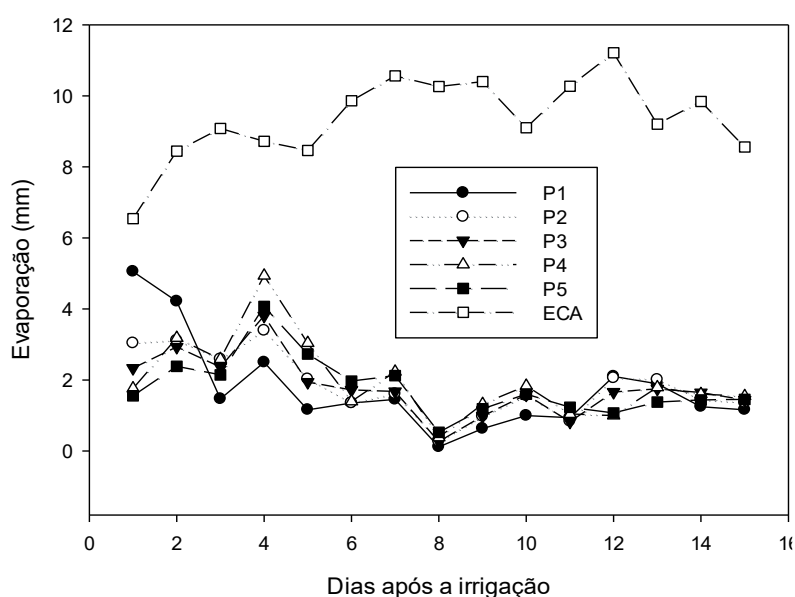


FIGURA 32. Evaporação direta do solo em dias após a última irrigação e evaporação do tanque classe A (ECA) para os níveis de palhada de milho de 0 (P0), 3 (P3), 6 (P6), 9 (P9) e 12 (P12) t ha⁻¹.

Observou-se que a evaporação acumulada sem o uso de palhada (P0), no período inicial de secagem, foi superior aos demais tratamentos. Entretanto, com a diminuição da água disponível no solo descoberto, o tratamento com o nível de palhada de 9 t ha⁻¹, apresentou um maior teor de umidade e, com isso, uma maior evaporação de água no solo (Figura 33), comportamento similar ao observado por Freitas et al. (2006).

A maior lâmina acumulada foi observada com 9 t ha⁻¹, com 32,10 mm e a menor no nível de palhada 12 t ha⁻¹, o qual totalizou 29,80 mm de água evaporada durante o período de 16 dias após a última irrigação. Fato corroborado por Rossatto et al. (2022) o qual constatou que a cobertura do solo tanto pelo dossel da cultura quanto pela palhada

diminuiu a quantidade de água evaporada no solo, já Aires et al. (2022) observou uma redução no coeficiente de evaporação do solo com o uso de cobertura morta.

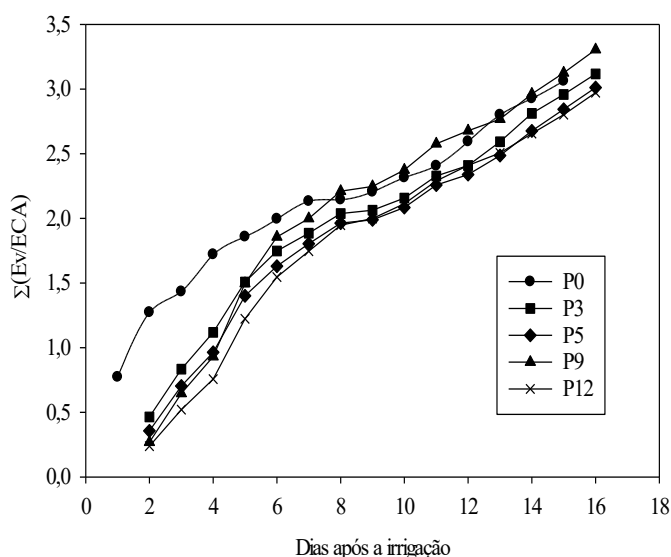


FIGURA 33. Valores acumulados da evaporação do solo com diferentes níveis de palhada 0 (P0), 3 (P3), 5 (P5), 9 (P9) e 12 (P12) t ha⁻¹ em relação a evaporação do tanque Classe A (Ev/ECA) em dias após a última irrigação.

O parâmetro U indica a lâmina evaporada no solo necessária para a mudança da fase 1 para a fase 2 no processo de evaporação, sendo os valores obtidos de 14,40 mm; 6,16 mm; 6,02 mm; 4,95 mm e 10,16 mm para os tratamentos P0, P3, P5, P9 e P12, respectivamente (Figura 34). O aumento dos níveis de palhada no solo diminuiu a quantidade de água evaporada necessária para que ocorresse a mudança de fase 1 para a fase 2. A partir dos valores de U obtidos, a diminuição da lâmina necessária foi de 57,22%; 58,16%; 65,62% e 23,96%. Esses valores do parâmetro U do modelo divergem dos resultados encontrados por Freitas et al. (2006). Para esses autores, a mudança na taxa de evaporação do solo utilizando níveis de palhada de 5.000 kg e 10.000 kg ha⁻¹ foi suave, não sendo possível determinar com clareza o parâmetro U do modelo de Ritchie.

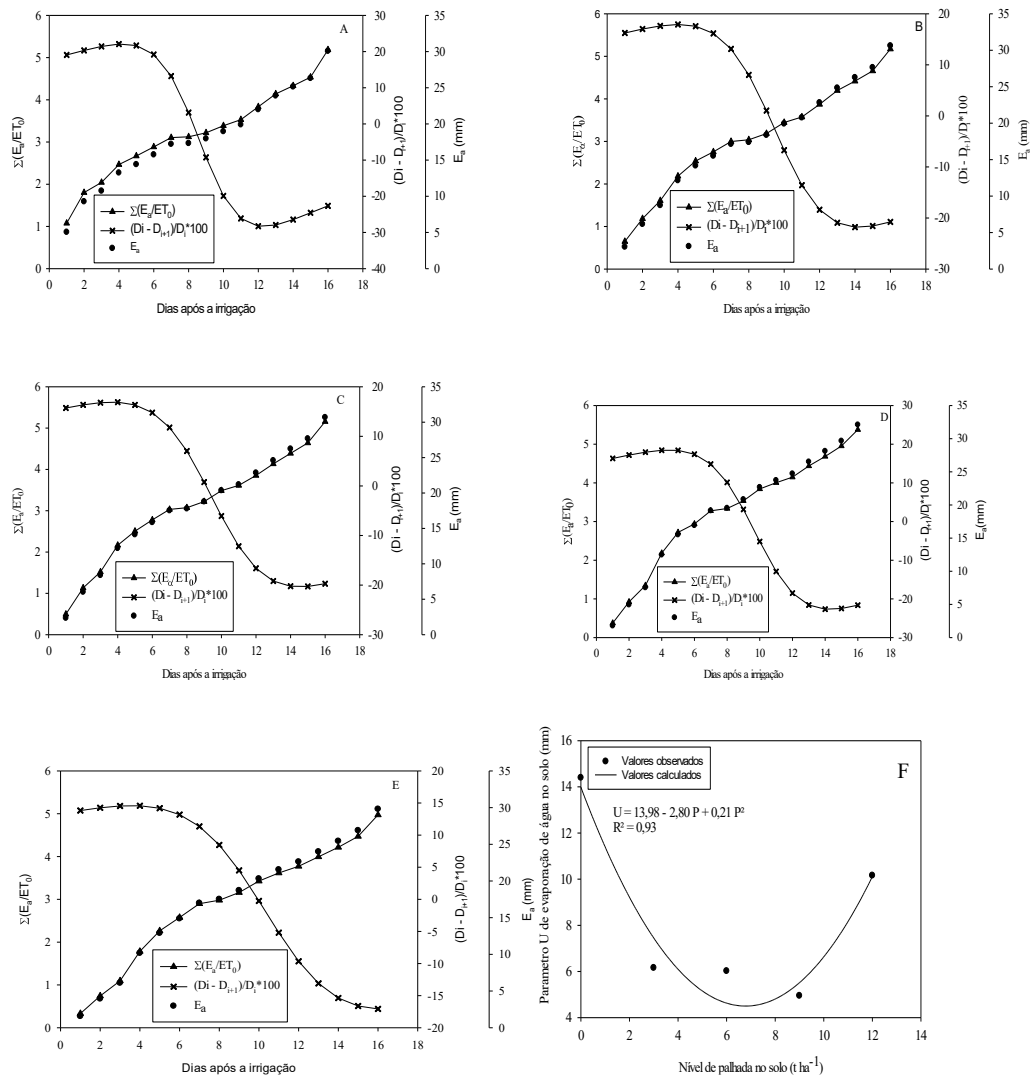
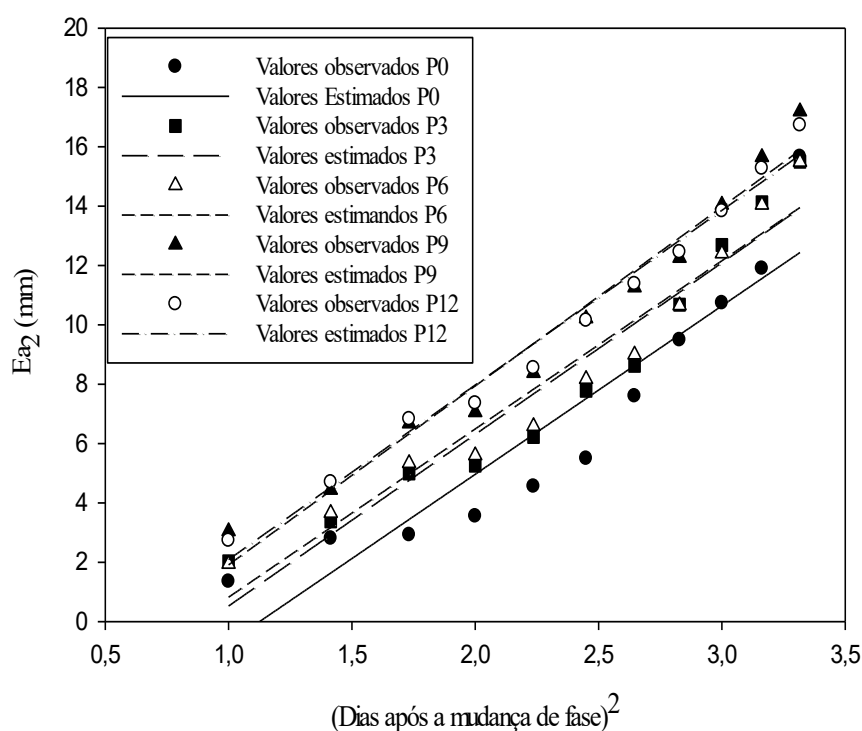


FIGURA 34. Curvas representativas para diferentes níveis de palhada no solo da razão entre a evaporação acumulada da água no solo (E_a) e a evaporação acumulada do taque Classe A (ECA), eixo y a esquerda, da razão entre a diferença do valor da derivada de primeira ordem no dia i pelo seu valor no dia $i + 1$ e a derivada no ponto 2, eixo y a direita, e da evaporação acumulada, eixo y mais à direita, para os níveis de palhada de milho de 0, 3, 6, 9 e 12 $t ha^{-1}$ (A, B, C, D e E, respectivamente). Destaca-se o final da fase 1 de evaporação e o valor do parâmetro U. Parâmetro U de evaporação de água no solo em função dos níveis de palhada (F).

À medida que os níveis de cobertura no solo foram aumentando, os valores de U foram diminuindo até alcançar o valor mínimo de 4,65 mm com a quantidade de palhada no solo de 6,67 $t ha^{-1}$. A diminuição dos valores da de U sugere que a mudança de fase no processo de secagem do solo ocorre mais cedo. Com isso, o solo irá perder uma menor

quantidade de água para atmosfera por livre demanda, resultando em uma maior quantidade de água que pode ser aproveitada pelas plantas (Figura 34).

Na Figura 35 estão apresentadas as curvas de evaporação acumulada na fase 2 em função da raiz quadrada do tempo transcorrido após a mudança. No tratamento P0 ocorreu uma menor evaporação de água no solo, quando comparado aos demais tratamentos. Por outro lado, os tratamentos P9 e P12 apresentaram a maior lâmina de água evaporada na fase 2 de secagem do solo. A maior quantidade de água evaporada no solo durante a fase 2 nos tratamentos com maiores níveis de palhada, P9 e P12, pode estar relacionada com um maior conteúdo de água disponível em função da manutenção da umidade do solo durante a fase 1 de secagem.



Tratamento	Equação	R ²
P0	$Ea_2 = 5,86 \text{ dia}^{0,5} - 6,39$	0,87
P3	$Ea_2 = 6,35 \text{ dia}^{0,5} - 6,33$	0,92
P6	$Ea_2 = 6,23 \text{ dia}^{0,5} - 5,92$	0,93
P9	$Ea_2 = 6,47 \text{ dia}^{0,5} - 4,95$	0,96
P12	$Ea_2 = 6,36 \text{ dia}^{0,5} - 4,68$	0,96

FIGURA 35. Parâmetro Ea_2 de evaporação de água no solo em função dos níveis de palhada no interior de lisímetros irrigado por aspersão convencional.

As equações de regressão da evaporação acumulada na fase 2 em função da raiz quadrada dos dias após a mudança de fase estão apresentadas na Figura 34A partir dessas equações, foi possível determinar o valor do parâmetro α do modelo de Ritchie para cada um dos tratamentos propostos. Levando em consideração que a variável α é obtido pelo coeficiente angular dessa reta de regressão, as curvas apresentam um bom ajuste com os dados observados com um coeficiente R^2 variando entre 0,87 e 0,96.

Os valores do parâmetro α para o tratamento P0 foi de 5,86 mm dia^{-0,5}; 6,35 mm dia^{-0,5} para P3; 6,23 mm dia^{-0,5} para P6; 6,47 mm dia^{-0,5} no P9 e 6,36 mm dia^{-0,5} no P12. O aumento do nível de palhada elevou os valores de α , sendo de 8,36% no tratamento P3; 6,31% no P6; 10,41% no P9 e de 8,53% no P12 (Figura 36). Pereira et al. (2014) otimizando o modelo de Ritchie a partir da equação de Bowen obteve o valor do parâmetro α de 4,93 mm dia^{-0,5} para as condições do Pantanal brasileiro.

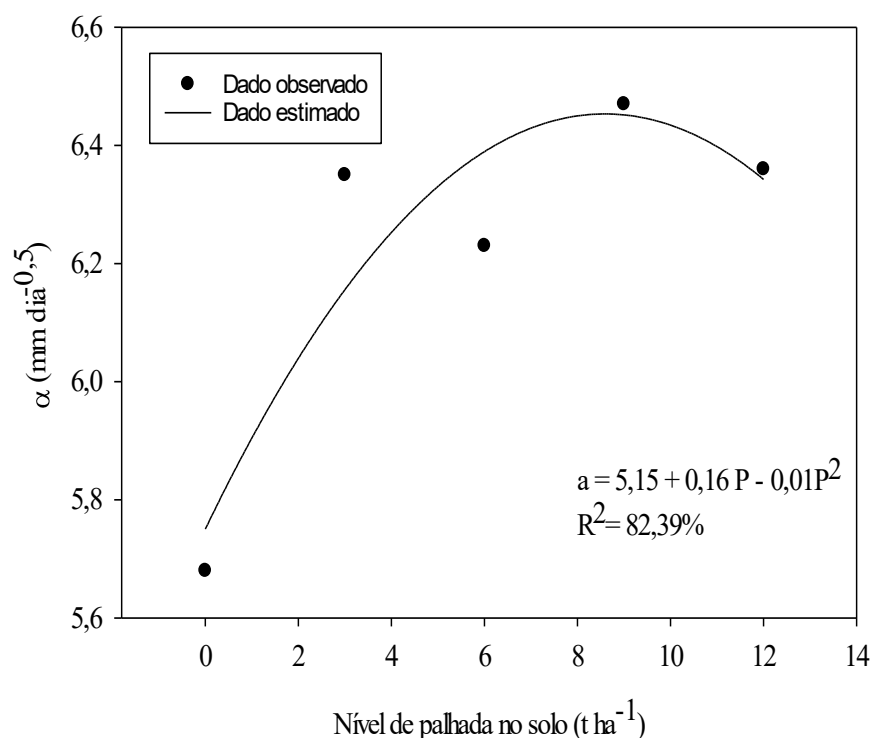


FIGURA 36. Valores observados e estimados do parâmetro α do modelo de Ritchie em função do nível de palhada no solo;

5.9 EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA

A maior eficiência do uso da água (EUA) da cultura da soja irrigada por microaspersão, no ano de 2019, foi obtida pelo tratamento M2C1, com 3,97 kg ha⁻¹ mm⁻¹. Esse valor foi próximo ao observado no tratamento M3C1, kg ha⁻¹ mm⁻¹, diferindo em

0,36 kg ha⁻¹ mm⁻¹ de soja produzida. Por outro lado, a menor EUA constatada foi no tratamento M5C1, 2,95 kg ha⁻¹ mm⁻¹, ou seja, houve uma redução de 25,69% na EUA entre o maior e menor valor (Tabela 11).

TABELA 11. Produtividade, lâmina de água aplicada por microaspersão e eficiência do uso da água (EUA) da cultura da soja cultivada nos anos de 2019 e 2020.

Tratamento	Produtividade (kg ha ⁻¹)	Lâmina aplicada via irrigação (mm)	Precipitação (mm)	Lâmina total (mm)	EUA (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)
Ano de 2019					
M1C1	3199,5	467,0	452,0	919	3,48
M2C1	3472,4	422,0	452,0	874	3,97
M3C1	3044,4	391,0	452,0	843	3,61
M4C1	2780,9	323,0	452,0	775	3,59
M5C1	2237,0	306,4	452,0	758,4	2,95
Ano de 2020					
M1C2	3868,7	128,0	651,8	779,8	4,96
M2C2	3462,5	105,0	651,8	756,8	4,57
M3C2	3518,0	83,0	651,8	734,8	4,79
M4C2	3568,7	37,0	651,8	688,8	5,18
M5C2	3340,5	30,5	651,8	682,3	4,89

No ano de 2020, a menor EUA foi observada no tratamento M2C1 apresentando o resultado de 4,57 kg ha⁻¹ produzido de soja para cada um mm de água disponível para a cultura. Contudo, a maior EUA ocorreu em M4C2, com 5,18 kg ha⁻¹ mm⁻¹, sendo que a diminuição da lâmina de água disponível aumentou a EUA em 4,43% em relação ao tratamento M1C2, tratamento com a maior lâmina disponibilizada para a soja. Resultado semelhante da EUA foi constatado por Soares et al. (2023), que observaram que a EUA da cultura da soja reduziu à medida que as lâminas de irrigação foram aumentando, sendo que a maior EUA foi notada no tratamento sem irrigação.

5.8. AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Os dados de viabilidade econômica para o cultivo equivalente a um hectare de soja para o primeiro e segundo semestre de 2024 e para o primeiro semestre de 2025 na região de Brasília está apresentado na Tabela 12.

Deve-se destacar que na avaliação econômica considerou-se apenas o valor da produção de um único ciclo de cultivo da soja por semestre, tanto em 2024 como e 2025 em comparação aos custos fixos e variáveis da implantação da irrigação por

microaspersão, o que conduziu a inviabilidade econômica. Porém, na prática entre os agricultores, cultiva-se duas ou três safras no mesmo local – mesmo que de culturas diferentes - o que pode tornar os investimentos em irrigação por microaspersão vantajosos economicamente. Aliado aos fatores acima descritos, cabe ressaltar que ocorreu uma elevação de 51% no custo de insumos entre o primeiro semestre de 2024 e o primeiro semestre de 2025, principalmente pela elevação dos preços do adubo mineral MAP e dos inoculantes utilizados na cultura da soja.

Para se obter o custo total de produção da cultura da soja, foi adicionado aos custos de insumos, o valor da energia elétrica gasta para o bombeamento da água para a irrigação em cada tratamento (Tabela 13).

TABELA 12. Custo de produção de um hectare de cultivo de soja na região de Brasília – DF para o primeiro e segundo semestre de 2024 e primeiro semestre de 2025 para o sistema de irrigação por microaspersão considerando a produção obtida nos ciclos de cultivo nos anos de 2019 (C1) e 2020 (C2)

Descrição	Unidade	Quant.	Valor	Valor	Valor	Valor total	Valor	Valor total
			unitário (R\$)	total (R\$)	unitário (R\$)	(R\$)	unitário (R\$)	(R\$)
			1º semestre de 2024	2º semestre de 2024	1º semestre de 2025			
INSUMOS								
Semente de soja	kg	50,00	10,00	500,00	13,50	675,00	14,00	700,00
Adubo mineral (Co, Mb, Ni)	L	0,10	116,90	11,69	106,00	10,60	568,23	56,82
Adubo mineral KCl	t	0,16	2597,02	415,52	2958,03	473,28	2893,00	462,88
Adubo mineral Mn	kg	0,50	9,96	4,98	6,45	3,23	7,41	3,71
Adubo mineral MAP	t	0,20	3637,50	727,50	4240,00	848,00	4950,00	990,00
Adubo mineral micronutrientes	L	1,00	26,50	26,50	38,69	38,69	64,42	64,42
Adubo mineral nitrato de K	kg	2,00	11,12	22,24	9,80	19,60	9,79	19,58
Adubo mineral (B)	kg	2,00	16,49	32,98	17,40	34,80	35,65	71,30
Adubo mineral (B)	kg	30,00	4,53	135,90	4,12	123,60	39,33	1179,90
Agrotóxico (2,4D)	L	0,50	34,14	17,07	19,40	9,70	23,35	11,68
Agrotóxico (Acefato)	L	1,00	199,75	199,75	62,03	62,03	66,46	66,46
Agrotóxico (Acetamiprid)	kg	0,20	44,20	8,84	29,50	5,90	120,43	24,09
Agrotóxico (adjuvante)	kg	1,00	126,33	126,33	52,16	52,16	66,77	66,77

Continuação...

			1º semestre de 2024	2º semestre de 2024	1º semestre de 2025			
Agrotóxico (Bixafem+propiconazol+trifloxistrobin a)	L	0,50	190,00	95,00	1900,00	950,00	-	0,00
Agrotóxico (carboxina+tiram)	L	0,15	77,00	11,55	77,59	11,64	77,30	11,60
Agrotóxico (clorotalonil)	kg	1,50	61,50	92,25	28,00	42,00	93,00	139,50
Agrotóxico (epoxiconazol+protioconazol+trifloxistrobina)	L	0,15	402,50	60,38	190,00	28,50	178,00	26,70
Agrotóxico (fipronil)	L	0,05	446,03	22,30	494,59	24,73	122,40	6,12
Agrotóxico (fludoxonil+metalaxil)	L	0,50	225,23	112,62	219,57	109,79	227,89	113,95
Agrotóxico (glifosato)	galão 20 L	0,30	690,71	207,21	552,03	165,61	530,40	159,12
Agrotóxico (mancozebe)	kg	1,50	27,35	41,03	37,65	56,48	47,68	71,52
Agrotóxico (Óleo mineral)	L	1,00	24,73	24,73	24,58	24,58	37,58	37,58
Agrotóxico (Picoxistrobina 90 g/l + Ciproconazol 40 g/l)	L	0,80	103,13	82,50	110,00	88,00	109,00	87,20
Agrotóxico (Procimidona 500 g/kg)	kg	1,00	113,11	113,11	121,10	121,10	130,62	130,62
Agrotóxico (Propiconazol 250 g/l + Difenconazol 250 g/l)	L	1,20	279,20	335,04	247,60	297,12	335,77	402,92
Agrotóxico (Zeta-cipermetrina 200 gL ⁻¹ + Bifentrina 180 gL ⁻¹)	L	0,25	210,00	52,50	175,00	43,75	-	0,00
Biológico Trichoderma	L	0,10	300,00	30,00	348,00	34,80	-	0,00
Estimulante de enraizamento	L	0,10	167,00	16,70	91,78	9,18	208,96	20,90
Inoculante (Azospirillum)	dose	1,00	2,50	2,50	4,04	4,04	73,20	73,20
Inoculante (Bradyrhizobium)	dose	5,00	2,50	12,50	1,90	9,50	63,37	316,85
Sub total				3541,22		4377,39		5315,37

Continuação...

SERVIÇOS			1º semestre de 2024		2º semestre de 2024		1º semestre de 2025	
Aração e gradagem	hm	4	62,00	248,00	62,00	248,00	62,00	248,00
Montagem do sistema de irrigação	hm	100	62,00	6200,00	62,00	6200,00	62,00	6200,00
Transporte interno em geral	hm	2	62,00	124,00	62,00	124,00	62,00	124,00
Adubação de cobertura e de fundação	hm	1	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00
Pulverização mecânica	hm	1	200,00	200,00	200,00	200,00	260,00	260,00
Plantio mecânico	hmc	0,5	200,00	100,00	200,00	100,00	260,00	130,00
Colheita mecânica	hmc	0,27	1350,00	364,50	1350,00	364,50	1350,00	364,50
Manutenção do sistema de irrigação	jd	4	34,00	136,00	34,00	136,00	34,00	136,00
Tratamento de sementes	dh	0,1	100,00	10,00	100,00	10,00	110,00	11,00
Sub total			7582,50		7582,50		7673,50	
CUSTO OPERACIONAL EFETIVO			11123,72		11959,89		12988,87	
CUSTOS INDIRETOS								
Custo da terra - 3 meses de uso	ha mês ⁻¹	3	757,00	2271,00	757,00	2271,00	757,00	2271,00
Administração - 3 meses de uso	ha mês ⁻¹	3	40,50	121,50	40,50	121,50	40,50	121,50
Impostos e taxas - por 3 meses	ha mês ⁻¹	3	38,23	114,69	38,23	114,69	38,23	114,69
Encargos sociais - por 3 meses	ha mês ⁻¹	3	11,84	35,52	11,84	35,52	11,84	35,52
Depreciação sistema Irrigação - por 3 meses	ha mês ⁻¹	3	50,00	150,00	8,30	24,90	50,00	150,00
Sub total			2692,71		2567,61		2692,71	
Custo total			13816,43		13691,33		15681,58	

TABELA 13. Consumo de energia elétrica para o cultivo irrigado de um hectare de soja na região de Brasília – DF irrigada por microaspersão.

Tratamento	Consumo de energia elétrica (KWh ha ⁻¹)	Valor unitário (R\$ KWh ⁻¹)	Valor total (R\$)
Ciclo C1 de 2019			
M1C1	931,38	0,9145017	851,75
M2C1	842,14	0,9145017	770,13
M3C1	780,04	0,9145017	713,35
M4C1	644,08	0,9145017	589,01
M5C1	587,27	0,9145017	537,06
Ciclo C2 de 2020			
M1C2	255,08	0,9145017	233,27
M2C2	209,99	0,9145017	192,04
M3C2	166,67	0,9145017	152,42
M4C2	74,01	0,9145017	67,68
M5C2	58,40	0,9145017	53,41

Os custos com insumos, utilizando o manejo de irrigação proposto para o ciclo C1 de 2019, representou, em média, 35,82% do custo total efetivo da cultura da soja no primeiro semestre de 2024. No segundo semestre de 2024, a despesa com insumos representou 40,06% e no primeiro semestre de 2025, 44,14%.

Por outro lado, quando o manejo de irrigação adotado foi referente ao realizado no ciclo de C2 2020, o custo com insumos passa a representar 32,68%; 37,33% e 41,78% para o primeiro e segundo semestres de 2024 e primeiro semestre de 2025, respectivamente. Essa diferença no custo com insumos ocorre pelo maior tempo de funcionamento do conjunto motobomba para o realizar o manejo da irrigação no ciclo C1 em 2019.

No custo de produção da cultura da soja, a participação do componente de serviços, representou, em média, 60% do custo total efetivo. A principal fonte de despesa foi a instalação do sistema de irrigação, sendo que essa variável representou de 39,53%, no primeiro semestre de 2025, a 45,28%, valor observado no segundo semestre de 2024, do custo total da cultura. Porém, deve-se destacar que o sistema apresenta vida útil de muitos anos, a depender da manutenção, o que resultara num custo desnecessário nos próximos

anos, e portanto, podendo tornar o cultivo da soja viável economicamente nos anos seguintes, mesmo que o agricultor cultivar apenas um ciclo por ano nesta área.

O valor médio de comercialização da soja na COOPA – DF no primeiro semestre de 2024, segundo semestre de 2024 e primeiro semestre de 2025 foi de R\$ kg⁻¹ 1,87; 2,15 e 1,89, respectivamente. Considerando a produtividade obtida de 2237 kg ha⁻¹ no tratamento M5C1, até 3868,70 kg ha⁻¹, observada no tratamento M3C1, a receita bruta média da produção de um hectare de soja variou entre R\$ 4197,52 e R\$ 8333,72. Portanto, o cultivo da soja irrigada por microaspersão não apresentou resultados econômicos satisfatórios em todos os manejos de irrigação propostos (Tabela 14). No entanto, na mesma área podem ser cultivados mais de um ciclo por ano, mesmo que de culturas diferentes, o que tornaria, possivelmente, o investimento lucrativo. Rapassi et al (2017) destaca que a implantação de um sistema de irrigação em uma propriedade rural requer um alto investimento, não apenas na aquisição do equipamento irrigação, mas também devido ao uso intensivo de insumo. Com isso, se faz necessário a análise econômica para viabilizar o empreendimento agrícola.

Deve-se destacar também que a produtividade obtida em todos os tratamentos utilizados foi abaixo da média para a região, tornando a relação benefício/custo inferior a 0,5, com exceção ao segundo ciclo de 2024, que foi pouco superior a 0,5.

TABELA 14. Avaliação econômica o cultivo irrigado de um hectare de soja na região de Brasília-DF irrigada por microaspersão.

Tratamento	Produtividade kg ⁻¹ ha ⁻¹ ano ⁻¹ (A)	Margem total da produção R\$/ha (B)	Custo total R\$ ha ⁻¹ (C)	Relação benefício/custo (B/C)	Ponto de Nivelamento (C/Preço)	Margem de segurança (%) (C-B)/B
Ciclo de produção/semestre de referência						
Ciclo 1/primeiro semestre de 2024						
M1C1	3199,50	6003,56	13924,59	0,43	7420,95	1,32
M2C1	3472,40	6515,59	13883,37	0,47	7398,98	1,13
M3C1	3044,40	5712,42	13843,75	0,41	7377,87	1,42
M4C1	2780,90	5218,09	13759,01	0,38	7332,71	1,64
M5C1	2237,00	4197,52	13744,73	0,31	7325,10	2,27
Ciclo 1/ segundo semestre de 2024						
M1C1	3199,50	6892,32	15379,25	0,45	7139,31	1,23
M2C1	3472,40	7480,15	15297,64	0,49	7101,42	1,05
M3C1	3044,40	6558,08	15240,86	0,43	7075,06	1,32
M4C1	2780,90	5990,57	15116,52	0,40	7017,34	1,52

M5C1	2237,00	4818,91	15064,56	0,32	6993,22	2,13
Ciclo 1/ primeiro semestre de 2025						
M1C1	3199,50	6043,56	16408,23	0,37	8686,71	1,71
M2C1	3472,40	6559,00	16235,61	0,40	8595,32	1,48
M3C1	3044,40	5750,48	16178,83	0,36	8565,26	1,81
M4C1	2780,90	5252,85	16054,49	0,33	8499,44	2,06
M5C1	2237,00	4225,48	16002,54	0,26	8471,93	2,79
Ciclo 2/ primeiro semestre de 2024						
M1C2	3868,70	7259,09	13924,59	0,52	7420,95	0,92
M2C2	3462,50	6497,00	13883,37	0,47	7398,98	1,14
M3C2	3518,00	6601,19	13843,75	0,48	7377,87	1,10
M4C2	3568,70	6696,18	13759,01	0,49	7332,71	1,05
M5C2	3340,50	6268,15	13744,73	0,46	7325,10	1,19
Ciclo 2/ segundo semestre de 2024						
M1C2	3868,70	8333,72	14760,77	0,56	6852,20	0,77
M2C2	3462,50	7458,81	14719,55	0,51	6833,06	0,97
M3C2	3518,00	7578,42	14679,92	0,52	6814,67	0,94
M4C2	3568,70	7687,47	14595,19	0,53	6775,33	0,90
M5C2	3340,50	7196,08	14580,91	0,49	6768,70	1,03
Ciclo 2/ primeiro semestre de 2025						
M1C2	3868,70	7307,45	15789,75	0,46	8359,28	1,16
M2C2	3462,50	6540,28	15657,52	0,42	8289,28	1,39
M3C2	3518,00	6645,17	15617,90	0,43	8268,30	1,35
M4C2	3568,70	6740,78	15533,16	0,43	8223,44	1,30
M5C2	3340,50	6309,91	15518,89	0,41	8215,88	1,46

A relação custo-benefício foi desfavorável ao uso da irrigação por microaspersão na cultura da soja considerando apenas a venda da produção de um único ciclo de cultivo de soja. Ela variou de 0,26 encontrada primeiro semestre de 2025 no tratamento M5C1 a 0,56, observada no tratamento M1C2 no período do segundo semestre de 2024. Isso representou que cada R\$ 1,00 gasto com o cultivo da soja irrigada, houve um retorno econômico variando de R\$ 0,26 a R\$ 0,56. Portanto, há um prejuízo econômico com a cultura variando de R\$ 0,74 a R\$ 0,44 a cada R\$ 1,00 investido na produção, mas que se for potencializada o uso da área com mais ciclos ao longo do ano poderá tornar viável o investimento em irrigação.

Como já destacado, esses resultados estão relacionados, em parte, a baixa produtividade quando comparado ao obtido em média na região. Ao mesmo tempo, considerando uma relação custo-benefício de 0,5, espera-se que em dois anos há compensação dos investimentos apenas com um ciclo de cultivo de soja. Porém, se

cultivado outra espécie de planta na mesma área, especialmente se for de maior valor econômico, o investimento em irrigação por microaspersão pode ser compensado com apenas um ano.

Esses resultados estão de acordo com Ripasse et al (2017) que analisando a viabilidade econômica do uso da irrigação para as culturas do feijão, milho e soja constaram que o retorno do capital investido para aquisição do sistema de irrigação ocorreu a partir do terceiro ano de produção.

O ponto de nivelamento também se mostrou desfavorável ao cultivo de soja irrigada por microaspersão com apenas a venda da produção de um ciclo de cultivo da soja. A produção mínima para cobrir os custos de produção foi de 6768,70 kg (M5C2 1/2024) a 8686,71 kg (M5C1 1/2025). A falta de rentabilidade também foi observada na margem de segurança que correspondeu a 0,77 a 2,79, relevando que para a receita se igualar a despesa, a produção de soja ou o preço de comercialização deve elevar 77% (M1C2 em 2/2024) a 279% para o primeiro semestre de 2025 no tratamento M5C1 (Tabela 14).

6. CONCLUSÕES

A produtividade usando a microaspersão no ciclo C1 em 2019 reduziu com a diminuição dos percentuais de água no solo, com maior valor de 3472,3 kg ha⁻¹ e menor de 2237,0 kg ha⁻¹. Já usando o gotejamento subsuperficial não houve variação de produtividade em função de diferentes períodos de estresse hídrico no solo (7, 14, 21, 30 dias sem irrigação e permanentemente sem irrigação), sendo o maior valor de 4289,2 kg ha⁻¹ obtido com período sem irrigação de 14 dias.

Em todas as datas avaliadas e em função do fator de depleção de água no solo (f) de 0,1, 0,2, 0,3, 0,5 e 0,7 (ciclo de cultivo 2, C2, utilizando a microaspersão em 2020), o índice de cobertura do solo (ICS) apresentou comportamento linear com o desenvolvimento da cultura da soja alcançando o seu valor máximo de 86,43% aos 55 DAS.

O total de sementes por planta e o número de vagens por planta reduziram de 0,1 em direção a 0,7 do fator de depleção de água no solo (f) (ciclo de cultivo 2, C2, utilizando a microaspersão em 2020).

O maior peso médio de mil grãos da cultura da soja irrigada por microaspersão, ciclo C2, em 2020, foi utilizando fator de disponibilidade de água no solo (f) de 0,1, com valor de 163,02 g.

As lâminas de irrigação influenciaram no índice de cobertura do solo (ICS) pela cultura da soja com o uso da microaspersão no ano de 2020, ciclo C2, sendo que fator de disponibilidade de água no solo (f) de 0,1 apresentou os maiores valores absolutos de ICS aos 87, 95 e 111 DAS.

O índice SPAD da cultura da soja irrigada por microaspersão no ano de 2019, ciclo C1, apresentou diferenças significativas apenas aos 115 e 125 DAS, sendo que a manutenção de 0,8 capacidade total de água no solo foi o que apresentou menor valor em relação às demais umidades, mas sempre mantendo valores elevado no período de 62 a 125 DAS. Já utilizando microaspersão no ciclo C2, no ano de 2020, com déficit hídrico corresponde ao fator de depleção de água no solo (f) de 0,3, foi o que apresentou maiores valores do índice SPAD no período de 27 a 62 DAS, com elevação dos índices a partir de 62 DAS até 97 DAS, independentemente do valor de f utilizado.

No ajuste do modelo de Ritchie, a aumento dos níveis de palhada de milho no solo no interior de microlisímetros de pesagem diminuiu a quantidade de água evaporada

necessária para que ocorresse a mudança de fase 1 para a fase 2. À medida que os níveis de cobertura no solo foram aumentados, os valores de U foram diminuindo até alcançar o valor mínimo de 4,65 mm com a quantidade de palhada no solo de 6,67 t ha⁻¹. O parâmetro α do modelo de Ritchie se elevou com o aumento dos níveis de palhada de milho até 10 t ha⁻¹.

Considerando apenas os ganhos da venda da produção de um ciclo de soja em relação aos custos fixos e variáveis para implantação da irrigação por microaspersão, não houve viabilidade econômica no Distrito Federal no primeiro e segundo semestre de 2024 e primeiro de 2025.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIRES, G. C.; MONTENEGRO, A. A. A.; CARVALHO, A. A.; MONTEIRO, A. L. N.; ALMEIDA, G. C. Umidade do solo e estresse hídrico simulado com Hydrus – 1D em área com sorgo forrageiro irrigado. **Agrometeoro**, Passo Fundo, v. 30, 2022.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n. 6, p.711-728, 2014.
- ALVES JUNIOR, J.; SALES, D. L. A.; PERREIRA, R. M.; RODRIGUEZ, W. D. M.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P. Viabilidade econômica da irrigação por pivô central nas culturas da soja, milho e tomate. **Pesquisa Agropecuária Pernambucana**, v. 22, p. 1 – 6, 2017.
- ALVES, E. S.; LIMA, D. F.; BARRETO, J. A. S.; SANTOS, D. P.; SANTOS, M. A. L. Determinação do coeficiente do cultivo para a cultura do rabanete através de lisimetria de drenagem. **Irriga**, Botucatu, v. 22, n. 1, p. 194 – 203, 2017.
- ANA: Agencia Nacional de Águas. **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. ANA, Brasília, 2017. 86p.
- ANAPALLI, S. S.; FISHER, D. K.; REDDY, K. N.; WAGLE, P.; GOWDA, P. H.; SUI, R. Quantifying soybean evapotranspiration using on eddy covariance approach. **Agricultural Water Management**, v. 209, p. 228 – 239, 2018.
- BAEUMLER, N. W.; KJAERGAARD, J.; GUPTA, S. C. Evapotranspiration from corn, soybean and prairie grasses using the METRIC model. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 2, p. 770 – 780, 2019.
- BALBINOT JUNIOR, A. A.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; PRIETO, J. P. C.; MORAES, M. T.; WERNER, F.; FERREIRA, A. S. Crescimento e distribuição de raízes de soja em diferentes densidades de plantas. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, n. 1, p. 12 – 22, 2018.
- BARBOSA, J. R.; PEREIRA FILHO, J. V.; OLIVEIRA, V. M.; SOUSA, G. G.; GOES, G. F.; LEITE, K. N. Produtividade da cultura da soja irrigada com déficit hídrico regulado no cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 14, n. 4, p. 4200–4210, 2020.

- BARIVIERA, G.; DALLACORT, R.; FREITAS, P. S. L.; BARBIERI, J. D.; DANIEL, D. F. 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.
- BARZOTTO, F.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; TORRES, R. R.; KIRCHNER, J. H.; ROSSO, R. B.; GIRARDI, L. B.; MEZZOMO, W. Efeito da irrigação e da adubação nitrogenada nos parâmetros de desenvolvimento e nos componentes de produção da cultura da soja. **Revista Espacios**, Caracas, v. 37, n. 21, p. 10, 2016.
- BASSO, B. & RITCHIE, J. T. Evapotranspiration in high-yielding maize and under increased vapor pressure deficit in the U.S Midwest. **Agricultural & Environmental Letters**, v. 3, n. 1, p. 1 – 6, 2018.
- BASSO, L. J. **Estimativa de rendimento e viabilidade econômica da soja irrigada**. 2019. 66p. Dissertação (Mestrado em engenharia agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2019.
- BASTOS, E. A.; FOLEGATTI, M. V.; ANDRADE JUNIOR, A. S.; CARDOSO, M. J.; FARIA, R. T. Manejo econômico da irrigação de feijão caupi via modelo de simulação. **Irriga**, v. 5, n. 2, p. 83 – 92, 2000.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A. & MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: Editora UFV, 2009. v. 1, p 630.
- BONATO, E. R.; BONATO, A. L. V. A soja no Brasil: história e estatística. **Embrapa soja**, 1987. 61 p. (EMBRAPA-CNPSO. Documentos, 21).
- BRISSON, N.; MARY, B.; RIPOCHE, D.; JEUFFROY, M. H.; RUGET, F.; NICOULLAUD, B.; GATE, P.; DEVIENNE-BARRET, F.; ANTONIOLETTI, R.; DURR, C.; RICHAUD, D. G.; BEUDOIN, N.; RECOUS, S.; TAYOT, X.; PLENET, D.; CELLIER, P.; MACHET, J. M.; DELÉCOLLE, R. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterizations applied to wheat and corn. **Agronomie**, n. 18, p. 311 – 346, 1998.
- CABREIRA, L. P.; OLIVEIRA, J. T.; BAIO, F. H. R.; OLIVEIRA, R. A.; CUNHA, F. F. Economic feasibility of center pivot irrigation with corn, cowpea, and soybean crops in sandy soils. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 44, n. 1, 2024.
- CASAGRANDE, E. C.; FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; OYA, T.; PEDROSO, J.; MARTINS, P. K.; BRETON, M. C.; NEPOMUCENO, A. L. Expressão gênica diferencial durante déficit hídrico em soja. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 13, n. 2, p. 168 – 184. 2001.

- CEB. Tarifas vigentes. **Disponível em:** <http://www.ceb.com.br/index.php/tudo-sobre-a-conta-de-luz/370-tudo-sobre-a-conta-de-luz>. Acesso em: 10 de mar 2019.
- CEPEA. Relatórios agrícolas. **Disponível em:** <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/categoria/relatorios-agricolas.aspx?mes=7&ano=2016>. Acesso em: 10 de mar 2019.
- CHRISTIANSEN, J. E. Irrigation by sprinkling. **Berkeley: California Agricultural Station**. 1942, 124p.
- CHRISTOFIDIS, D. Evolução da irrigação no Brasil e no mundo. In: RODRIGUES, L. N. & DOMINGUES, A. F. **Agricultura irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável**. INOVAGRI, 2017. 327 p.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos, v.6, safra 2018/2019 – décimo segundo levantamento**. CONAB, Brasília, 2019. 126p.
- CORRÊA, M. F.; NAVROSKI, R.; SCHUCH, L. O. B.; JUNIOR, F. D. J. V.; DE ALMEIDA, T. L.; RODRIGUES, H. C. S.; GADOTTI, G. I. Efeito da irrigação por aspersão no rendimento e potencial fisiológico das sementes de soja. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, 18(4), 482-488. 2019.
- CORRÊA, M. F.; NAVROSKI, R.; SCHUCH, L. O. B.; VERNETTI JUNIOR, F. de J.; ALMEIDA, T. L.; RODRIGUES, H. C. S.; NADAL, A. P.; GADOTTI, G. I. Effect of sprinkler irrigation on yield and physiological potential of soybean seeds. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 18, n. 4, p. 482–488, 2019.
- DANIEL, F. D.; RODRIGUES, N. N.; RAMBO, J. R.; DALBIANCO, A. B. Custo de produção e análise econômica do abacaxizeiro cultivar ‘Pérola’ em Tangará da Serra-MT, Brasil. **Revista de Ciências Agrônômicas**, v. 28, n. 4, p. 435 – 451, 2019.
- DCBH Paranaíba. Deliberação N° 61/2016. 2016.
- EMATER. Custo de Produção. Disponível em: <https://emater.df.gov.br/valida-documento/?f=SAuGVsjjX407%2FEChEaUNena5oPko3BVghUHbf93c5r4nA3Q%2FDvI5y8ekY3lZe4VvORoAQCUDT7YZW%2Ffx57CtpsV83UFDRYru483iG6Zoug3Z62i%2BhkbMYEM8%3D>. Acesso em: 10 de mar de 2025.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. Embrapa Solos. Rio de Janeiro. 2ed. rev. e atual. 1997. 212p.

- EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja região central do Brasil 2014**. Embrapa Soja, 2013. 265 p. (EMBRAPA SOJA. Sistema de produção, 16).
- FAO. FAOSTAT. **Disponível em:** <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RL/visualize>
Acesso em 22 de jul 2024.
- FARIAS, J. R. B.; ASSAD, E. D.; ALMEIDA, I. R.; EVANGELISTA, B. A.; LAZZAROTTO, C.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, n.3 (Nº Especial: Zoneamento Agrícola), p. 415 – 421, 2001.
- FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. Ecofisiologia da soja. **Embrapa soja**, Londrina – PR, 2007. (Circular técnica 48).
- FARZANPOUR, H.; SHIRI, J.; SADRADDINI, A. A.; TRAJKOVIC, S. Global comparison of 20 reference evapotranspiration equations in a semi-arid region of Iran. **Hydrology Research**, v. 50, n. 1, p. 282 – 300, 2019.
- FAVETTA, G. M. & BOTREL, T. A. Uniformidade de sistemas de irrigação localizada: validação de equações. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 2, p. 427 – 430, 2001.
- FLUMIGNAN, D. L.; ALMEIDA, A. C. S.; GARCIA, R. A. Necessidade de irrigação complementar da soja na região sul de Mato Grosso do Sul. **Embrapa Agropecuária Oeste**, 2015 8 p. (**Embrapa Agropecuária Oeste**. Circular Técnica 34).
- Fractional Green Canopy Cover. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 6, p. 2312–2320,
- FREITAS, P. S. L.; MONTAVANNI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; COSTA, L. C. Influência da cobertura de resíduos de culturas nas fases da evaporação direta da água no solo. **Revista Brasileira Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 104 – 111, 2006.
- GAVA, R.; FRIZZONE, J. A.; SNYDER, R. L.; ALMEIDA, B. M.; FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R. Estratégias de manejo de déficit hídrico na irrigação da cultura da soja. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 10, n. 3, p. 305 – 315, 2016.
- GAVA, R.; FRIZZONE, J. A.; SNYDER, R. L.; JOSÉ, J. V.; FRAGA JUNIOR, E. F.; PERBONI, A. Estresse hídrico em diferentes fases da cultura da soja. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 9, n. 6, p. 349 – 359, 2015.

- GAVA, R.; LIMA, S. F.; SANTOS, O. F.; ANSELMO, J. L.; COTRIM, M. F.; KÜHN, I. E. Water depehs for different soybean cultivars in center pivot. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 1, p. 10 – 15, 2018.
- GAZZONI, D. L.; DALL'AGNOL, A. **A saga da soja: de 1050 a.C. a 2050 d.C.** Brasília, DF: Embrapa, 2018. 199 p
- GILETSON, A. A.; ZUR, Y.; CHIVKUNOVA, O. B.; MERZLYAK, M. N. Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. **Photochem. Photobiol.** 2002, 75, 272–281.
- GONEN, E. The effects of different irrigation and tillage on the physiology of soybean. **Research Square**, 2024.
- GUIMARÃES, D. P.; LANDAU, E. C. Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil em 2013. **Embrapa Milho e Sorgo**, 2014. 40 p. (EMBRAPA MILHO E SORGO: Boletim de pesquisa e desenvolvimento 106).
- GUIMARÃES, T. G.; FONTES, P. C. R.; PEREIRA, P. R. G.; ALVAREZ, V. V. H.; MONNERAT, P. H. Teores de clorofila determinados por medidor portátil e sua relação com formas de nitrogênio em folhas de tomateiro cultivado em dois tipos de solo. **Bragantia**, Piracicaba, v. 58, n. 1, p. 209-216, 1999.
- IBEGE. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/26537-ibge-preve-safra-recorde-de-graos-em-2020>. Acesso em: 29/01/2020
- IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola.** Rio de Janeiro, v. 30, n. 12, p. 1 – 82, 2017.
- 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 American Journal**, Madison, v. 38, n. 5, p. 831 – 837, 1974.
- IRMAK, S.; MUTIIBWA, D.; PAYERO, J.; MAREK, T.; POTER, D.; Modeling soybean canopy resistance form micrometeorological and plant variables for estimating evapotranspiration using one – step Penman-Monteith approach. **Journal of Hydrology**, v. 507, p. 1 – 18, 2013.
- KAYA, Y. Z.; MAMAK, M.; ÜNES, F.; DEMIRC, M. Evapotrasnpiration prediction using M5T method and Ritchie equation for St. Johns, FL, USA. **Environmental Engeneering**, 10th International Conference Vilinius Gedminas Techincal University Lithuania, 2017.

- KELLER, J.; KARMELI, D. **Trickle irrigation desing**. Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation, 1975. 133 p.
- KUKAL, M.; IRMARK, S.; KILIC, A. Long-term spatial and temporal maize and soybean evapotranspiration trends derived from ground-based and satellite-based datasets over the great plains. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 143, n. 9, p. 04017031-1 – 04017031-18, 2017.
- MAJIDI, M.; ALIZADEH, A.; VAZIFEDOUST, M.; FRAID, A.; AHMADI, T. Analysis of the effect of missing weather data on estimating daily reference evapotranspiration under different climatic conditions. **Water Resources Management**, v. 29, p. 2107 – 2124, 2015.
- MARKWELL, J.; OSTERMAN, J.C.; MITCHELL, J.L. Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. **Photosynthesis Research**, v. 46, p. 467-472, 1995.
- MARTINS, C. A. S.; REIS, E. F.; PASSOS, R. R.; GARCIA, G. O. Desempenho de sistemas de irrigação por aspersão convencional na cultura do milho (*Zea mays* L.). **Idesia**, v. 29, n. 3, p. 65 – 74, 2011.
- MATSUNAGA, M.; BERNELMANS, P. F.; TOLEDO, P. E. N.; DULLEY, R. D.; OKAWA, H.; PEDROSO, I. A. **Metodologia de custos de produção utilizada pelo IEA**. Boletim Técnico do Instituto de Economia Agrícola, São Paulo, v.23, n1, p. 123 – 139, 1976.
- MEOTTI, G. V.; BENIN, G.; SILVA, R. R.; BECHE, E.; MUNARO, L. B. Épocas de semeadura e desempenho agrônômico de cultivares de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 1, p. 14 – 21, 2012.
- MERTZ-HENNING, L. M.; FERREIRA, L. C.; HENNING, F. A.; MANDARINO, J. M. G.; SANTOS, E. D.; OLIVEIRA, M. C. N. D.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N. Effect of water deficit-induced at vegetative and reproductive stages on protein and oil content in soybean grains. **Agronomy**, v. 8, n. 3, p. 1 – 11, 2018.
- MUALEM, Y. A. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Resource Research**, v. 12, p. 513 – 522, 1976.
- MUTAVA, R. N.; PRINCE, S. J. K.; SYED, N. H.; SONG, L.; VALLIYODAN, B.; CHEN, W.; NGUYEN, H. T. Understanding abiotics stress tolerance mechanisms in soybean: A comparative evaluation of soybean response to drought and flooding stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 86, p. 109 – 120, 2015.

- NEVES, O. S. C.; CARVALHO, J. G.; MARTINS, F. A. D.; PÁDUA, T. R. P.; PINHO, P. J. Uso do SPAD-502 na avaliação dos teores foliares de clorofila, nitrogênio, enxofre, ferro e manganês do algodoeiro herbáceo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 5, p. 517–521, maio 2005.
- OLIVEIRA, T. C.; FERREIRA, E.; DANTAS, A. A. A. Temporal variation of normalized difference vegetation index (NDVI) and of the crop coefficient (Kc) from NDVI in areas cultivated with irrigation soybean. **Ciência Rural**, v. 46, n. 9, p. 1683 – 1688, 2016.
- OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, A. E.; BOTTEGA, E. L.; DA SILVA, C. M.; GOMES, J. I. T. Influência da irrigação suplementar na produtividade de cultivares de soja para a safra e safrinha 2018-19 e 2019-20 na região central do RS. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 15580–15595, 2021.
- OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, A. E.; BOTTEGA, E. L.; SILVA, C. M.; GOMES, J. I. T. Influência da irrigação suplementar na produtividade de cultivares de soja para a safra e safrinha 2018-19 e 2019-20 na região central do RS. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 2, p. 18894–18907, 2021.
- PADIYEDATH, S. G.; KAWAMURA, A.; SAHOO, B.; AMAGUCHI, H. Effect of evapotranspiration on the discharge estimation in Baitarani watershed, India, in the context of climate change. **World Environmental and Water Resources Congress**. p. 577 – 588, 2017.
- PATRIGNANI, A. & OCHSNER, T. E. Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring
- PELISSARI, F & COIMBRA, R. de A. Sementes de soja esverdeadas: causas e consequências na qualidade fisiológica. **Scientific Electronic Archives** n. 16.v. 4. 2023.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. FEALQ. 1997. 183p.
- PEREIRA, R. B. O.; MUSIS, C. R.; BIUDES, M. S. Modelagem da evapotranspiração pelo modelo de Ritchie no Pantanal Norte. **UNOPAR**, Londrina, v. 13, n. 1, p. 21 – 27, 2014.
- PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBANÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, p. 141–150, 1999.

- PHILIP, J. R. Evaporation, moisture, and heat fields in the soil. **Journal of Meteorology**, Washington, DC, v. 14, p. 354 – 366, 1957.
- 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.
- RAPASSI, R. M.; SANT’ANA, A. L.; TARSITANO, R. A.; PROENÇA, E. R. Viabilidade econômica da implantação de um conjunto de irrigação pivô central na produção de grãos no Mato Grosso do Sul. **Cultura Agronômica**, v. 26, n. 4, p. 596 – 510, 2017.
- RICHETTI, A.; FLUMIGNAN, D. L.; ALMEIDA, A. C. S. Viabilidade econômica da soja irrigada na safra 2015/2016, na região sul de Mato Grosso do Sul. **Embrapa Agropecuária Oeste**, 2015, 7 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Comunicado técnico, 203).
- 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.
- ROBERTO, C. H. V.; VILLELA, S. D. J.; LEONEL, F. P.; SILVA, L. D.; BASTOS, P. H. F.; MARTINS, P. G. M. A. Performance and economic evaluation of feedlot cattle fed sugarcane tops. **Livestock Science**, v. 230, 2019.
- RODRIGUES, L. N. & MOREIRA, J. M. M. A. P. Desenvolvimento de um modelo de simulação de estratégias de irrigação. **III Inovagri International Meeting**, Fortaleza, 2015.
- RODRIGUES, L. N.; AZEVEDO, J. A.; SOCCOL, O. J.; SILVA, E. M. Modelo de Ritchie: descrição e aplicação. **Embrapa Cerrados**, 2005. 29 p. (EMBRAPA CERRADOS. Documentos, 133).
- RODRIGUES, O.; DIDONET, A. D.; LHAMBY, J. C. B.; BERTAGNOLLI, P. F.; LUZ, J. S. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 3, p. 431 – 437, 2001.
- ROSSATTO, A. A. P.; KIRCHNER, J. H.; MARTINS, J. D.; SANDER, L. S.; AMARAL, N. B.; PETRY, M. T.; Partição da evapotranspiração da cultura da soja em diferentes cultivares em cada estágio fenológico. **Irrriga**, Botucatu, v. 27, n. 3, p. 477 – 492, 2022.
- RUVIARO, C.; DORNELES, J. G. L.; SILVA, A. M.; BEN, C. A. V. Comportamento da soja submetida a diferentes regimes hídricos e viabilidade da irrigação

- suplementar na região do Vale do Jaguari – RS. **Perspectiva**, v. 35, n. 131, p. 79 – 90, 2011.
- SANTOS, C. G.; MARTINS, G. L. M.; SILVA, P. A.; ZOZ, T. Custo de produção de soja transgênica em sistema de semeadura direta em São Desidério-BA. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, n. 2, p. 96 – 101, 2017.
- SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: história, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 1 – 12, 1996.
- SHRIVASTANA, S. & SHARMA, A. R. The DSSAT model simulations of soil moisture and evapotranspiration over central India and comparison with remotely-sensed data. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 4, n. 1, p. 27 – 37, 2018.
- SILVA, E. S.; CARVALHO, M. A. C.; DALLACORT, R. Cultivares de soja em função de elementos climáticos nos municípios de Tangará da Serra e Diamantino - MT. **Nativa**, Sinop, v. 8, n. 2, p. 259–266, 2020.
- SILVA, F. A. M.; AFFHOLDER, F.; CORBEELS, M.; EVANGELISTA, B. A.; MALAQUIAS, J. V. Uso do modelo STICS para avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre a produção de grãos de milho no cerrado brasileiro. **XIX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, p. 407 – 417, 2015.
- SKAGGS, K. E. & IRMAK, S. Analysis of microclimate data measured over grass and soybean and their impacts on Penman-Monteith grass and alfalfa reference evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 138, n. 2, p. 120 – 134, 2012.
- SOARES, F. C.; FERREIRA, A. M.; PARIZI, A. R. C.; CHUQUEL, M. D.; RUSSI, J. L. Produtividade da água e de grãos em soja irrigada por aspersão convencional. **Inovagri**, 2023.
- SOARES, J. V. & ALMEIDA, A. C. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing *Eucalyptus* plantation in Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 253, n. 1–4, p. 130–147, 2001.
- SOUZA P. J.O. P.; ORTEGA-FARIAS, S.; ROCHA, E. J. P.; SOUSA, A. M. L.; SOUZA, E. B. Consumo hídrico da soja no nordeste do Pará. **Irriga**, edição especial, irrigação, p. 218 – 231, 2016.
- SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa-CPAC, 2004. p. 147 – 168.

- VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 892 – 896, 1980.
- VAN GENUCHTEN, M. T.; SIMUNEK, J.; LEIJI, F. J.; SEJNA, M. **RETIC** version 6.02, 2009. **Disponível em:** <https://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?retc>, acessado em: 11 fev 2019.
- VERÓN, S. R.; ABELLEYRA, D.; LOBELL, D. B. Impacts of precipitation and temperature on crop yields in the Pampas. **Climatic Changer**, v. 130, n. 2, p. 235 – 245, 2015.
- WIEBBCKE, C. E.; GRAHAM, M. A.; SILVIA, R. C.; REID, G. P. Day temperature influences the male-sterile locus ms9 in soybean. **Crop Science Abstract**, v. 52, n. 4, p. 1503 – 1510, 2012.
- YANG, X.; ZHENG, L.; YANG, Q.; WANG, Z.; CUI, S.; SHEN, Y. Modelling the effects of conservation tillage on crop water productivity, soil water dynamics and evapotranspiration of a maize-winter wheat-soybean rotation system on the Loess Plateau of China using APSIM. **Agricultural System**, n. 166, p. 111 – 123, 2018.
- ZANATTA, J. M.; PARUSSULO, D. B.; WELLER, J. A.; SCHONS, L. P.; BAGGIO, D. K. Análise de viabilidade econômica da produção de uma propriedade rural: estudo das culturas da soja, trigo e milho. **Revista de la Agrupación Joven Iberoamericana de Contabilidad y Administración de Empresas**, n. 19, p.