

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Produtividade da área e da água em soja irrigada para diferentes
variedades e metodologias de manejo da irrigação**

Ana Carolina Ferreira França

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2023**

Ana Carolina Ferreira França
Bacharela em Engenharia Agrônoma

Produtividade da área e da água em soja irrigada para diferentes variedades e metodologias de manejo da irrigação
versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **RUBENS DUARTE COELHO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

França, Ana Carolina Ferreira França

Produtividade da área e da água em soja irrigada para diferentes variedades e metodologias de manejo da irrigação / Ana Carolina Ferreira França. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2023.

73 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Produtividade da água
2. *Glycine max*
3. Agricultura irrigada
4. Eficiência do uso da água L. . I. Título

*Aos meus pais,
Eliene Ferreira do Rosário França e Jair França de Souza,
que até aqui me guiaram e caminharam comigo para mais uma conquista,
DEDICO.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me abençoar, proteger e permitir chegar até aqui.

Aos meus pais, por todo suporte e amor, que sem os quais eu jamais teria finalizado mais essa etapa. Essa conquista é nossa!

À minha irmã e toda a minha família, pelo apoio e carinho durante essa jornada.

Aos meus amigos, de longa data e recentes, pelos momentos de verdadeira amizade, alegria e respeito, que tornaram meus dias mais leves.

Aos meus colegas de departamento e amigos, em especial Alice, Michele, Sarah, Carlos, Júnior e Hugo, por todo apoio e momentos especiais ao longo dessa jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rubens Duarte Coelho, pela oportunidade, acolhimento, paciência e conhecimento para a conclusão desta etapa.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas e ao Departamento de Biosistemas ESALQ/USP, pelo conhecimento e qualificação.

À empresa Compass Minerals e sua equipe pelo apoio e contribuição no fornecimento de insumos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo fornecida.

Por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa.

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. A IMPORTÂNCIA SOCIOECONÔMICA DA SOJA	17
2.2. CARACTERÍSTICAS DA CULTURA	18
2.3. FATORES DE PRODUÇÃO E MANEJO DA CULTURA DA SOJA	20
2.4. RELAÇÕES HÍDRICAS DA CULTURA DA SOJA	22
2.5. PRODUTIVIDADE DA ÁGUA X EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA	26
3. OBJETIVOS	27
4. MATERIAL E MÉTODOS	29
4.1. ÁREA EXPERIMENTAL.....	29
4.2. CONDUÇÃO DA CULTURA	29
4.3. TRATAMENTOS E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	32
4.4. IRRIGAÇÃO.....	34
4.4.1. MANEJO DA IRRIGAÇÃO VIA TENSIOMETRIA.....	34
4.4.2. MANEJO DA IRRIGAÇÃO VIA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E BALANÇO HÍDRICO DO SOLO.....	35
4.4.3. MANEJO DA IRRIGAÇÃO VIA TEMPERATURA DO DOSSEL.....	37
4.5. AVALIAÇÕES	37
4.5.1. AVALIAÇÕES BIOMÉTRICAS E DE PRODUTIVIDADE	37
4.5.2. AVALIAÇÕES FISIOLÓGICAS	38
4.6. ANÁLISE ESTATÍSTICA	39
5. RESULTADOS	41
5.1. PARÂMETROS METEOROLÓGICOS	41
5.2. MANEJOS DE IRRIGAÇÃO E DEMANDA HÍDRICA	42
5.3. EFEITOS DOS MANEJOS DE IRRIGAÇÃO NAS RESPOSTAS FISIOLÓGICAS.....	45
5.4. EFEITOS DOS MANEJOS DE IRRIGAÇÃO NAS RESPOSTAS MORFOLÓGICAS, DE RENDIMENTO E PRODUTIVIDADE DA ÁGUA	48
5.5. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS PARA OS PARÂMETROS AVALIADOS	53

6. CONCLUSÃO.....	55
REFERÊNCIAS.....	56
APÊNDICES.....	71

RESUMO

Produtividade da área e da água em soja irrigada para diferentes variedades e metodologias de manejo da irrigação

A soja é uma das principais *commodities* produzidas pelo Brasil, com grande representatividade econômica. Entre os principais desafios de produção, a irregularidade das chuvas em algumas regiões de cultivo, faz com que a disponibilidade hídrica no solo seja o principal fator relacionado à variação de produtividade desse grão nas áreas de cultivo. Nesse sentido, a irrigação se apresenta como uma possibilidade de garantir a produtividade e a qualidade dos grãos. Um manejo adequado da irrigação pode resultar em economia de água e melhorar o rendimento das culturas, especialmente em grandes áreas plantadas. Entretanto, poucas informações regionalizadas sobre a cultura da soja estão disponíveis em termos de manejo de irrigação e sua interação com a produtividade da água para variedades de soja. O objetivo do presente trabalho foi quantificar o impacto dos manejos de irrigação via solo, clima e planta na fisiologia, na produtividade da área e na produtividade da água de três variedades de soja. O experimento foi conduzido em ambiente protegido, com um delineamento inteiramente casualizado em parcelas subdivididas com cinco repetições. Foram testados três manejos de irrigação, MS, MC e MP (MS – via potencial matricial do solo, MC – via balanço hídrico climatológico e MP – via temperatura do dossel, respectivamente) e as variedades de soja: TMG 7067 (V1), 58i60RSF IPRO (V2) e NA 5909 (V3). Foi constatado que o consumo de água entre os manejos de irrigação variou de 310 a 786 mm. O consumo de água em MS foi em média 42 e 49% superior a MC e MP, respectivamente. Houve um aumento significativo na taxa fotossintética, transpiração, condutância estomática e potencial hídrico foliar à medida que o consumo hídrico por tratamento foi maior, porém, dentro de cada variedade, os dois últimos quesitos variaram, sendo o potencial hídrico foliar altamente relacionado ao rendimento de grãos, sendo este maior em MS ($3,5 \text{ Mg ha}^{-1}$) do que em MC ($2,5 \text{ Mg ha}^{-1}$) e MP ($2,2 \text{ Mg ha}^{-1}$). Também foi certificado que o tratamento MP resultou em um aumento significativo da produtividade da água quando comparado a MS em todas as variedades de soja, exceto V2, que atingiu os maiores valores desse parâmetro sob todos os manejos de irrigação (média de $0,84 \text{ kg m}^{-3}$). Apesar da facilidade de uso dos manejos MC e MP, os resultados sugerem que eles devem ser calibrados em relação a MS sob diferentes condições climáticas e variedades para maiores rendimentos e produtividade da água para a cultura da soja.

Palavras-chave: Agricultura irrigada, Eficiência do uso da água, *Glycine max*, Produtividade da água

ABSTRACT

Area and water productivity in irrigated soybean for different varieties and irrigation management methodologies

Soybean is one of the main commodities produced by Brazil, with great economic representativeness and a planted area of approximately 40.8 million hectares. Among the main production challenges, the irregularity of the rainy season in some growing regions ensures that water availability the main factor related to the variation in productivity of this grain in the country. In this sense, irrigation presents itself as a possibility to improve grain productivity and quality, by making water available in a balanced way for the crop. An adequate irrigation schedule can result in significant water savings and improve crop yields, especially in large areas such as commodities. However, little information is available on the soybean crop in terms of irrigation management and its interaction with water productivity for soybean varieties. The objective of the present work was to quantify the impact of different irrigation management (soil, climate and plant) on the physiology, area yield and water productivity of three soybean varieties. The experiment was conducted in a protected environment of rain, with an entirely randomized design in subdivided plots with five repetitions. Three irrigation managements were tested, MS, MC and MP (soil matric potential, water balance and canopy temperature, respectively) and soybean varieties, TMG 7067 (V1), 58i60RSF IPRO (V2) and NA 5909 (V3). Water consumption for all irrigation managements was found to range from 310 to 786 mm. The average water consumption in MS was on average 42 and 49% higher than MC and MP, respectively. There was a significant increase in photosynthetic rate, transpiration, stomatal conductance, and leaf water potential as the water consumption per treatment was higher, but within each variety, the last two items varied, being the leaf water potential highly related to grain yield, being this higher in MS (3.5 Mg ha^{-1}) than in MC (2.5 Mg ha^{-1}) and MP (2.2 Mg ha^{-1}). It was also certified that the MP treatment resulted in a significant increase in water productivity when compared to MS in all soybean varieties except V2, which achieved the highest values of this parameter under all irrigation managements (average of 0.84 kg m^{-3}). Despite the ease of use of MC and MP managements, the results suggest that they should be calibrated against MS under different climatic conditions and varieties for higher yields and water productivity for soybean crop.

Keywords: Irrigated agriculture, *Glycine max*, Water productivity, Water use efficiency

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Produção total de soja por região em milhões de toneladas.....	18
Figura 2. Estruturas morfológicas de <i>Glycine max</i>	19
Figura 3. Grupos de maturidade relativa (GM) de acordo com a região do Brasil.....	21
Figura 4. Local de realização do experimento.....	29
Figura 5. A-C. Plantio. A: tratamento de sementes; B: adubação de plantio; C: semeadura.....	31
Figura 6. Pragas ao longo do ciclo da cultura da soja. A: lagarta-da-soja (círculo superior) e mosca-branca (círculo inferior); B: injúria causada por mosca-minadora (círculo).....	31
Figura 7. Ajuste dos emissores em cada parcela experimental.....	32
Figura 8. A-C. Início dos manejos de irrigação. A: V2; B: V1; C:V3.....	33
Figura 9. Croqui do esquema experimental. BO: parcelas de bordadura.....	33
Figura 10. A-D. Análises ao longo do ciclo da soja. A: equipamento IRGA posicionado em campo; B: leitura do equipamento IRGA na cultura da soja; C: coleta de amostras para análise em câmara de Scholander; D: câmara de Scholander.....	39
Figura 11. Valores diários da temperatura máxima, mínima e média do ar obtidas pela estação meteorológica no interior da estufa ao longo do experimento.....	41
Figura 12. Registros médios diários de tensão da água no solo ao longo do ciclo da cultura da soja para o manejo via solo. A: TMG 7067; B: 58i60RSF IPRO; C: NA 5909.....	43
Figura 13. Registros médios diários da diferença entre temperatura do ar e do dossel da cultura (ΔT) em °C ao longo do ciclo da cultura da soja para o manejo via planta. A: TMG 7067; B: 58i60RSF IPRO; C: NA 5909.....	45
Figura 14. Valores médios de produtividade da água em kg m^{-3} para as três variedades de soja submetidas aos diferentes manejos de irrigação. MS: manejo via solo, baseado no potencial	

matricial do solo; MC: manejo via clima, baseado na evapotranspiração e balanço hídrico do solo; MP: manejo via planta, baseado na temperatura do dossel da cultura; V1: variedade TMG 7067; V2: variedade 58i60RSF IPRO; V3: variedade NA 5909; M: manejos de irrigação; V: variedades; *: diferença significativa à 0,05; **: diferença significativa à 0,01.....52

Figura 15. Análise de componentes principais para os parâmetros mais relevantes avaliados ao longo do experimento. MS: manejo via solo, baseado do potencial matricial do solo; MC: manejo via clima, baseado na evapotranspiração e balanço hídrico do solo; MP: manejo via planta, baseado na temperatura do dossel da cultura; V1: variedade TMG 7067; V2: variedade 58i60RSF IPRO; V3: variedade NA 5909; iEUA: eficiência intrínseca do uso da água; PA: produtividade da água; P100: massa de 100 grãos; RG: rendimento de grãos; Ψ hídrico: potencial hídrico foliar; BA: biomassa acima do solo; A: taxa fotossintética; E: transpiração; gs: condutância estomática; IAF: índice de área foliar; DC: diâmetro do caule; AP: altura de plantas; NNP: número de nós por planta.....54

Figura 16. Plantas de soja sob os diferentes manejos de irrigação. A: manejo via planta; B: manejo via solo; C: manejo via clima.....73

Figura 17. Condução da cultura. A: estágio vegetativo; B: estágio reprodutivo; C: senescência.....73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estádios vegetativos da cultura da soja.....	19
Tabela 2. Estádios reprodutivos da cultura da soja.....	20
Tabela 3. Resultado da análise de solo de macro e micronutrientes.....	30
Tabela 4. Valores de umidade de saturação (Θ_s), residual (Θ_r), e dos parâmetros empíricos (α , m e n) do modelo de van Genuchten.....	34
Tabela 5. Coeficientes de cultura (K_c) adotados ao longo do ciclo produtivo da cultura da soja.....	36
Tabela 6. Parâmetros físico-hídricos do solo. Θ_{cc} : umidade na capacidade de campo referente ao potencial mátrico (Ψ_m) de -4,85 kPa; Θ_{pmp} : umidade no ponto de murcha permanente referente ao potencial mátrico (Ψ_m) de -1500 kPa; D_s : densidade do solo; D_p : densidade de partículas do solo.....	36
Tabela 7. Profundidade adotada para cálculo em função do crescimento da soja.....	36
Tabela 8. Valores mensais e médios dos dados meteorológicos registrados pela estação meteorológica no interior da estufa ao longo do experimento.....	42
Tabela 9. Resumo do consumo de água e número de eventos de irrigação para cada estágio de desenvolvimento das variedades de soja submetidas aos manejos de irrigação.....	42
Tabela 10. Valores médios de taxa fotossintética, condutância estomática, transpiração, eficiência intrínseca do uso da água e potencial hídrico foliar para as três variedades de soja submetidas aos diferentes manejos de irrigação. MS: manejo via solo, baseado do potencial matricial do solo; MC: manejo via clima, baseado na evapotranspiração e balanço hídrico do solo; MP: manejo via planta, baseado na temperatura do dossel da cultura; V1: variedade TMG 7067; V2: variedade 58i60RSF IPRO; V3: variedade NA 5909; M: manejos de irrigação; V: variedades; *: diferença significativa à 0,05; ** diferença significativa à 0,01; ns: não significativo. Médias seguidas por letras minúsculas distintas dentro de uma coluna e letras maiúsculas distintas dentro de uma linha são diferentes pelo teste LSD à 0,05.....	47

Tabela 11. Valores médios de altura de plantas, índice de área foliar, diâmetro do caule e número de nós por planta para a três variedades submetidas aos diferentes manejos de irrigação. MS: manejo via solo, baseado do potencial matricial do solo; MC: manejo via clima, baseado na evapotranspiração e balanço hídrico do solo; MP: manejo via planta, baseado na temperatura do dossel da cultura; V1: variedade TMG 7067; V2: variedade 58i60RSF IPRO; V3: variedade NA 5909; M: manejos de irrigação; V: variedades; *: diferença significativa à 0,05; ** diferença significativa à 0,01; ns: não significativo. Médias seguidas por letras minúsculas distintas dentro de uma coluna e letras maiúsculas distintas dentro de uma linha são diferentes pelo teste LSD à 0,05.....49

Tabela 12. Valores médios de rendimento de grãos, massa seca, número de vagens por planta e peso de 100 grãos para as três variedades de soja submetidas aos diferentes manejos de irrigação. MS: manejo via solo, baseado do potencial matricial do solo; MC: manejo via clima, baseado na evapotranspiração e balanço hídrico do solo; MP: manejo via planta, baseado na temperatura do dossel da cultura; V1: variedade TMG 7067; V2: variedade 58i60RSF IPRO; V3: variedade NA 5909; M: manejos de irrigação; V: variedades; *: diferença significativa à 0,05; ** diferença significativa à 0,01; ns: não significativo. Médias seguidas por letras minúsculas distintas dentro de uma coluna e letras maiúsculas distintas dentro de uma linha são diferentes pelo teste LSD à 0,05.....50

1. INTRODUÇÃO

A cultura da soja é um dos principais fatores do sucesso do agronegócio brasileiro, sendo estimadas 122,43 milhões de toneladas da cultura em uma área de plantada de 40,8 milhões de hectares, com expectativa de 77 milhões de toneladas exportadas na safra 2020/21 (CONAB, 2022). Além disso, essa leguminosa apresenta grande importância alimentar sendo fonte de proteínas de qualidade e matéria-prima para diversos produtos da indústria (CABRAL; MODESTA, 1981).

Com o nome científico *Glycine max* L. Merrill, essa cultura possui origem na China e é pertencente à família *Fabaceae*, apresentando ciclo anual e crescimento herbáceo com porte ideal de 60 a 110 cm. Em relação a ecofisiologia da cultura, a temperatura adequada de cultivo de acordo com Farias et al. (2007) é entre 20 e 30°C. Quanto a demanda hídrica, a soja pode ser considerada uma cultura resistente ao estresse hídrico quando esse fato não ocorre nos estádios críticos de desenvolvimento. Entretanto, a irregularidade do período chuvoso em algumas regiões de cultivo faz com que a disponibilidade hídrica seja o principal fator relacionado a variação de produtividade desse grão no país (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007). Dessa maneira, a tecnologia de irrigação é uma ferramenta aliada no aumento de produtividade dessa cultura (KUSS, 2006).

Um desafio para a agricultura é realizar o uso eficiente dos recursos hídricos, uma vez que a tecnologia da irrigação se torna cada vez mais necessária em decorrência do aumento de demanda alimentar e das mudanças climáticas. Assim, a seleção da estratégia de irrigação adequadas à realidade do produtor é uma forma de racionalizar o uso da água na agricultura, proporcionando um aumento da eficiência do uso desse recurso natural, reduzindo custos de energia e aumentando da chamada “produtividade da água” (FRIZZONE, 2007; DU et al., 2015).

O manejo eficiente da irrigação tem como objetivo fornecer o volume de água adequado no momento ideal de acordo com a necessidade da cultura. Quando não realizado de forma correta, o excesso ou a restrição de água via irrigação pode ocasionar baixo rendimento de grãos, baixa produtividade da água, salinização e encharcamento do solo (YOHANNES et al., 2019; ALMEIDA et al., 2022; QUILOANGO-CHIMARRO et al., 2022).

A quantidade de água ideal a ser aplicada pode ser definida pelo monitoramento da cultura, das condições atmosféricas ou pelo conteúdo de água do solo, considerando a eficiência do sistema de irrigação adotado e a capacidade de armazenamento de água no solo (JAMES,

1988; STEELE et al., 1994). O manejo da irrigação baseado em parâmetros do solo é realizado através do monitoramento do potencial hídrico e da umidade solo com o uso de sensores específicos, determinando o nível de umidade de forma direta ou indireta (BWAMBALE et al., 2022). Dentre as principais opções para esse manejo, a tensiometria é considerada um método confiável para a programação da irrigação plena nas culturas de arroz, cana-de-açúcar, tomate, pepino, etc. (BUTTARO et al., 2015; KUMAR et al., 2017; SANTOS et al., 2019).

Manejos baseados nos parâmetros climáticos utilizam dados climatológicos e de solo para estimar a evapotranspiração potencial da cultura (ETp) e contabilizar periodicamente o teor de água do solo através da estimativa de entradas e saídas de água no volume de solo explorado pelas raízes (STEELE et al., 1994; ANDRADE, 2012). Esse manejo tem sido empregado em todo mundo para culturas como a soja e o milho (da SILVA et al., 2019; PEREIRA et al., 2020; YI et al., 2022).

O manejo da irrigação baseado em parâmetros da cultura utiliza sensores para monitorar o status da água nas plantas, através da temperatura do dossel da cultura, do potencial hídrico foliar, das taxas de fluxo de seiva, da resistência estomática e da pressão de turgor (CONEJERO et al., 2007; ZIMMERMANN et al., 2013; ÇOLAK et al., 2015; CANNAVO et al., 2016; VEYSI et al., 2017; COSTA et al., 2020bb). Em relação a temperatura do dossel da cultura, mais especificamente a diferença termal desta superfície para a temperatura do ar, esta possibilita o cálculo do *Crop Water Stress Index* (CSWI) que está correlacionado com a necessidade de irrigação das culturas (VEYSI et al., 2017; RU et al., 2020). Pesquisas indicam resultados promissores para cultivos como a soja, gergelim e abóbora, entretanto, os métodos baseados no solo e no clima ainda são mais utilizados (NILSEN, 1990; KHORSANDI et al., 2018; KIRNAK et al., 2019).

Pesquisas recentes foram desenvolvidas para melhorar o manejo da irrigação na cultura da soja, em trabalhos como de Gajić et al., 2018; Anapalli et al., 2022; Bhatti et al., 2022, porém, utilizando apenas um genótipo e um manejo de irrigação. Garcia et al. (2010) avaliando o comportamento de quatro genótipos de soja sob três regimes de irrigação encontraram variação de respostas em função de diferenças genotípicas para a eficiência do uso da água. Em trabalho semelhante, Cotrim et al. (2021) encontraram diferenças no desempenho fisiológico em pesquisa com dez genótipos de soja sob as condições de irrigação ótima e déficit de água. Assim, a busca por alternativas de estratégias adequadas de acordo com a realidade do produtor é uma forma de racionalizar o uso da irrigação, bem como proporcionar um aumento da eficiência de uso da água, reduzindo custos de energia, alcançando maiores rendimentos e

aumentando da chamada produtividade da água (DU et *al.*, 2015; KANG et *al.*, 2017; SOUZA e RODRIGUES, 2022; MARIN et *al.*, 2022).

Dessa maneira, o objetivo do presente trabalho foi avaliar diferentes estratégias de manejo de irrigação na cultura da soja (via solo, clima e planta) em três variedades de soja, e os impactos nos parâmetros fisiológicos, de rendimento por unidade de área e produtividade da água. Além disso, as análises aqui realizadas podem contribuir para a melhoria da irrigação ajudando produtores, técnicos e pesquisadores a buscar um manejo da irrigação eficiente, de acordo com as características de cada variedade de soja e sua necessidade hídrica em condições tropicais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A importância socioeconômica da soja

O agronegócio é um setor de grande importância para o Brasil, representando 27,4% do produto interno bruto (PIB) brasileiro em 2021 e com crescimento de 8,36% em relação à 2020 (CNA, 2022). Dentro desse setor a cultura da soja é um dos principais produtos comercializados, tendo sido produzidas na última safra 122,4 milhões de toneladas do grão em uma área de plantada de 40,8 milhões de hectares, de acordo com o sétimo levantamento da safra de grãos 2021/2022 realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2022).

Estima-se que no ano de 2021, um a cada quatro dólares exportados pelo Brasil na agricultura, deva-se à cultura da soja, comércio exterior esse que garante ao país o posto de maior produtor e exportador mundial desse grão, seguido pelos EUA, o qual obteve uma produção de aproximadamente 120,43 milhões de toneladas (USDA, 2021). Hoje a soja responde como a principal cultura de grande parte das propriedades rurais do Brasil, em termos de área plantada e rentabilidade proporcionada aos agricultores (EMBRAPA, 2022).

Historicamente o cultivo da soja no Brasil e a expansão das fronteiras agrícolas para novas áreas de plantio garantiu a realização da agricultura comercial nacional através do desenvolvimento tecnológico, melhorando o comércio internacional e acelerando a mecanização das lavouras. Atrelado a isso, mudanças como modernização do sistema de transporte, aceleração da urbanização e crescimento na região do Cerrado, e aumento na área de pesquisas trazem para a cultura sua importância socioeconômica, enriquecendo a dieta dos brasileiros e impulsionado o desenvolvimento do país (EMBRAPA, 2022).

O ponto inicial do cultivo de soja no Brasil é o ano de 1901, com a distribuição de sementes para produtores paulistas. Apesar disso, foi no Rio Grande do Sul que os primeiros cultivos apresentaram bom desenvolvimento devido a essa região possuir características climáticas semelhantes ao local de origem dos primeiros cultivares trazidos ao país a partir dos EUA. Posteriormente, a década de 70 é marcada como o início da expansão da soja pela ampliação da indústria de óleo e do aumento da demanda internacional pelo grão, impulsionando a criação de pesquisas e tecnologias, como o desenvolvimento de cultivares adaptadas a regiões produtoras, principalmente no Centro-Oeste (APROSOJA, 2022). Hoje essa região é a principal produtora do grão, sendo o Mato Grosso o maior estado produtor de soja do Brasil (Figura 1). Esses fatores também influenciaram a expansão de novas fronteiras

agrícolas, como a região dos estados de Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (MATOPIBA), que a cada safra vem apresentando importantes resultados de produção (USDA, 2022).

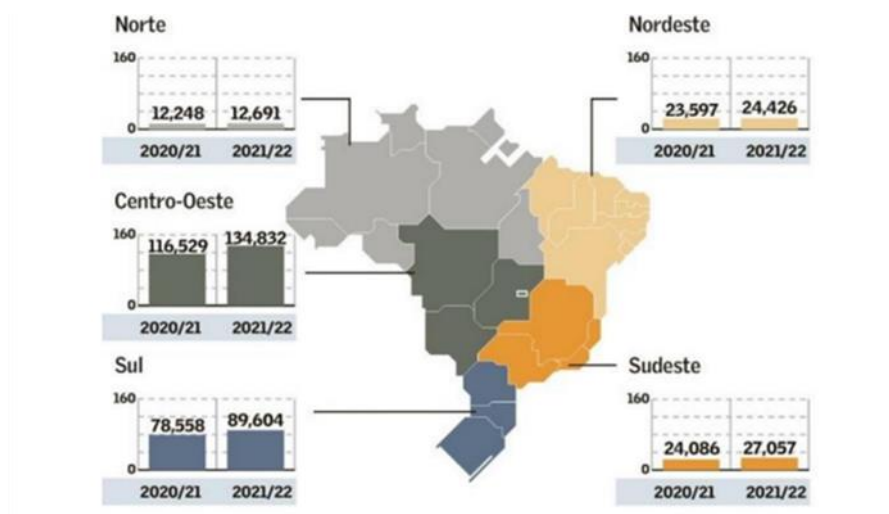


Figura 1. Produção total de soja por região em milhões de toneladas. Fonte: Oilseeds and Products Annual – USDA.

Além de sua importância econômica, a soja, composta por 18% de óleo e aproximadamente 40% de proteína, apresenta papel fundamental na alimentação humana por possuir proteína de qualidade, rica em aminoácidos essenciais presentes em diversos alimentos como óleo, farinha, fibras e resíduos (CABRAL; MODESTA, 1981; TANWAR; GOYAL, 2021). De acordo com relatório da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico - OECD e Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação - FAO (2018), o cultivo da soja será responsável por 62% do aumento da área cultivada na América Latina e Caribe nos próximos 7 anos, sendo 54% da produção processada na origem (farinha e óleo). O Brasil desempenhará papel fundamental no fornecimento mundial de alimentos, como um dos principais produtores desse grão.

2.2. Características da cultura

A soja é uma planta herbácea, com folhas trifolioladas e inflorescência tipo racemo variando entre roxas, brancas ou intermediárias (FLORA E FUNGA DO BRASIL, 2022). Desenvolve legumes contendo de uma a cinco sementes lisas elípticas ou globosas e podem apresentar crescimento determinado, semideterminado ou indeterminado (Figura 2). No Brasil a maioria das cultivares utilizadas apresentam crescimento determinado, pausando o desenvolvimento vegetativo após o florescimento, sendo este uniforme em toda a planta. A

estatura das plantas varia de acordo com o ambiente de cultivo e cultivar adotada, possuindo como porte ideal 60 a 110 cm de altura para facilitar o manejo na lavoura (DZIKOWSKI, 1936).

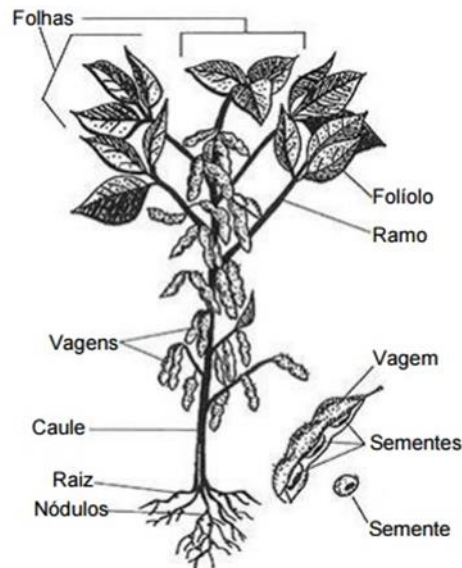


Figura 2. Estruturas morfológicas de *Glycine max*. Fonte: Neto (2015).

Fehr e Caviness (1977) dividiram o ciclo da cultura em vegetativo e reprodutivo, dando origem a classificação adotada em escala mundial. Os estádios vegetativos, representados pela letra V, e reprodutivos, representados pela letra R, são seguidos de números que representam a fase específica em que se encontra a cultura. A descrição resumida de cada etapa dos estádios pode ser visualizada nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Estádios vegetativos da cultura da soja

Estádio	Denominação	Descrição
VE	Emergência	Cotilédones acima da superfície do solo
VC	Cotilédone	Cotilédones completamente abertos
V1	Primeiro nó	Folhas unifolioladas completamente desenvolvidas
V2	Segundo nó	Primeira folha trifoliolada completamente desenvolvida
V3	Terceiro nó	Segunda folha trifoliolada completamente desenvolvida
V4	Quarto nó	Terceira folha trifoliolada completamente desenvolvida
V5	Quinto nó	Quarta folha trifoliolada completamente desenvolvida
V6	Sexto nó	Quinta folha trifoliolada completamente desenvolvida
V...
Vn	Enésimo nó	Ante-enésima folha trifoliolada completamente desenvolvida

Fonte: Adaptado de Fehr e Caviness (1977).

Tabela 2. Estádios reprodutivos da cultura da soja

Estádio	Denominação	Descrição
R1	Início do florescimento	Uma flor aberta em qualquer nó do caule (haste principal)
R2	Florescimento pleno	Uma flor aberta num dos 2 últimos nós do caule com folha completamente desenvolvida
R3	Início da formação da vagem	Vagem com 5 mm de comprimento num dos 4 últimos nós do caule com folha completamente desenvolvida
R4	Vagem completamente desenvolvida	Vagem com 2 cm de comprimento num dos 4 últimos nós do caule com folha completamente desenvolvida
R5	Início do enchimento do grão	Grão com 3 mm de comprimento em vagem num dos 4 últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida
R6	Grão cheio ou completo	Vagem contendo grãos verdes preenchendo as cavidades de um dos 4 últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida
R7	Início da maturação	Uma vagem normal no caule com coloração de madura
R8	Maturação plena	95% das vagens com coloração madura

Fonte: Adaptado de Fehr e Caviness (1977).

2.3. Fatores de produção e manejo da cultura da soja

Quanto a demanda nutricional, a soja apresenta baixa taxa de absorção de nutrientes na fase inicial do ciclo, sendo a absorção máxima a partir do 30º dia de ciclo até o estágio R5 (CARMELLO; OLIVEIRA, 2006). A ordem de exigência decrescente de nutrientes é de N, K, Ca, Mg, P e S e a quantidade exigida de cada um varia, assim como a taxa de exportação, de acordo com a cultivar utilizada, fertilidade da área de cultivo, condições climáticas e manejo empregado (EMBRAPA SOJA, 2001).

A soja é uma cultura sensível ao fotoperíodo e cada cultivar possui um fotoperíodo crítico que acima deste o florescimento é atrasado, sendo uma planta de dia curto. Devido a isso passou-se a adotar cultivares que possuem período juvenil longo, que graças a características fisiológicas apresentam menor sensibilidade ao fotoperíodo, o que possibilitou adaptação mais ampla e utilização destas em maiores latitudes e diferentes épocas de plantio (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007). A escolha da cultivar para plantio no Brasil é baseada no grupo de maturidade relativa (GM), que é embasado na duração do ciclo da cultura e na região de plantio (ALLIPRANDINI *et al.*, 2009). A Figura 3 apresenta os GM's adotados no Brasil em relação a região de plantio.

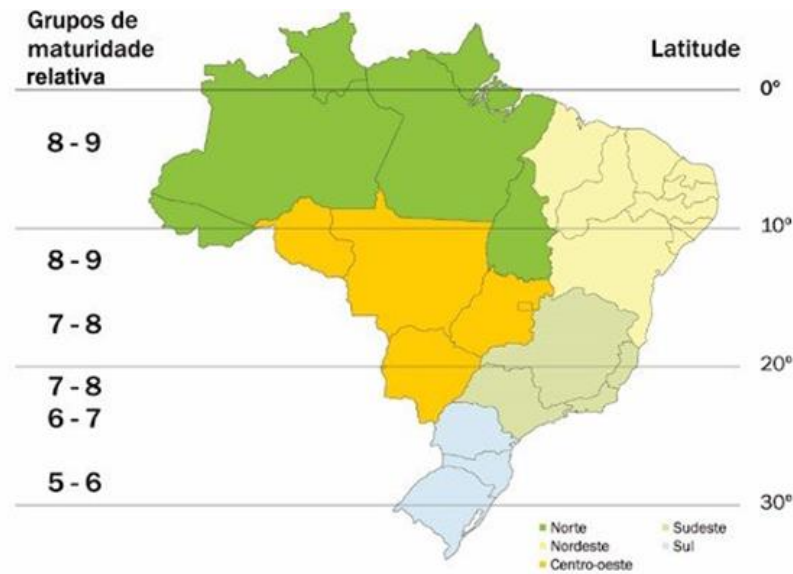


Figura 3. Grupos de maturidade relativa (GM) de acordo com a região do Brasil. Fonte: Alliprandini et al. (2009).

O bom desenvolvimento da cultura da soja também depende de fatores como temperatura, disponibilidade de água e tratos culturais adequados. Em relação à temperatura, de acordo com Garcia et al. (2007), a soja apresenta boa resposta cultivada em locais com oscilação de temperatura entre 20 e 30°C.

A agricultura é uma das atividades antrópicas mais dependentes das condições climáticas, influenciando principalmente os cultivos tradicionais, como em sistema de sequeiro (GORNALL et al., 2010). Em relação a necessidade hídrica, a soja pode ser considerada uma cultura resistente ao estresse hídrico quando este não ocorrer nos estádios críticos de desenvolvimento, como germinação, emergência, floração e enchimento de grãos (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005). Entretanto, a irregularidade do período chuvoso em algumas regiões de cultivo garante à disponibilidade hídrica o principal fator relacionado a variação de produtividade desse grão no país (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).

Nesse contexto, a irrigação se apresenta como uma possibilidade de melhorar a produtividade e qualidade dos grãos, ao disponibilizar água de forma equilibrada para a cultura e anular a competição por esse fator dentro da lavoura (KUSS, 2006). De acordo com a Agência Nacional de Águas – ANA (2021) a agricultura irrigada representa menos de 20% do total da área cultivada no Brasil, totalizando cerca de 8,2 milhões de hectares. Entretanto, a agricultura irrigada proporciona uma produtividade significativamente maior do que áreas de sequeiro e

hoje corresponde por 40% da produção de alimentos, fibras e cultivos bioenergéticos (GUIMARAES; LANDAU, 2020). Dessa forma fica evidente a importância estratégica da agricultura irrigada para o aumento de produtividade e segurança alimentar das principais culturas plantadas no Brasil.

2.4. Relações hídricas da cultura da soja

A cultura da soja necessita de, em média, 450 a 800 mm de água por ciclo, variando de acordo com a localidade de plantio, a cultivar escolhida, o sistema de cultivo adotado e o volume de solo explorado pelas raízes (FEITOSA *et al.*, 2010; EMBRAPA, 2011; LUDWIG *et al.*, 2011). O pico de transpiração da planta está na fase de florescimento e enchimento de grãos, onde são demandados entre 7 e 8 mm de água por dia (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).

A água é o principal fator limitante para o cultivo da soja, assim como para a maioria das culturas, sendo que este estresse abiótico causa diversas alterações morfológicas e fisiológicas nas plantas dependendo da duração do estresse hídrico, época de ocorrência e interação com outros fatores limitantes. Durante o período vegetativo, o estresse hídrico ocasiona menor absorção de nutrientes e conseqüentemente interfere na capacidade fotossintética, reduzindo o desenvolvimento de estruturas morfológicas como caule e parte aérea (BONATO, 2000; JALEEL *et al.*, 2009). Durante a fase reprodutiva, a falta de água influencia diretamente na produção, causando abortamento de flores, mau desenvolvimento de vagens e enchimento de grãos. Em escala fisiológica, o estresse hídrico ocasiona alterações em parâmetros como teor de clorofila, atividade enzimática, concentração intercelular de CO₂ (C_i), taxa de fotossintética (A), condutância estomática (g_s) e transpiração (E). A diminuição da g_s e da E ocasiona elevação da temperatura foliar, facilmente detectada em imagens termais ou amostragens do dossel das plantas (PARKSH; SINGH, 2020; KHORSANDI *et al.*, 2021).

O fechamento estomático é um mecanismo de defesa das plantas contra o estresse hídrico, que por consequência encerra o processo de trocas gasosas e a transpiração (TAIZ; ZEIGER, 2006). Entretanto, a transpiração foliar, que também é conhecida como resfriamento evaporativo, é um dos principais modos de dissipação de calor pelas plantas através da perda de vapor de água liberado pelos estômatos (PAIVA *et al.*, 2005). Como isso não acontece em estresse hídrico, ocorre uma elevação da temperatura do dossel e influência no balanço de energia (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

Os primeiros estudos sobre a relação da temperatura foliar de plantas e temperatura do ambiente foram citados por Ehlers (1915). Ao longo do tempo pesquisas usando diferentes sensores como termômetro de mercúrio e termopares foram desenvolvidas para avaliação da temperatura foliar (MILER; SAUNDERS, 1923; EATON; BELDEN, 1929). Posteriormente, alguns estudos passaram a analisar não só a relação, mas também a diferença entre as temperaturas da folha e do ar que envolve o dossel da planta, obtendo correlação com a condição hídrica e potencial de água nas folhas, sendo que a temperatura do dossel das culturas se apresenta mais elevada que a do ambiente sob condição de estresse hídrico no solo (SUBBARAO et al., 1995; GUIMARÃES, 2005; MENDES et al., 2007).

Uma das formas eficientes para registrar a temperatura foliar é através da termometria por infravermelho (DEJONGE et al., 2015). O termômetro infravermelho registra a energia nessa faixa emitida pelos corpos em função da temperatura dos mesmos (CAMPBELL; NORMAN, 1998). De acordo com Garcia et al. (2000), o avanço na criação de termômetros a infravermelho portáteis e de valor mais acessível na década de 70, impulsionou o desenvolvimento de pesquisas para avaliar o estresse hídrico em culturas através da temperatura do dossel de plantas. Além disso, o fácil manuseio, a possibilidade de medida rápida e contínua, e o fato de ser um método não destrutivo faz com que a termometria por infravermelho seja utilizada para o monitoramento do déficit hídrico nas culturas (KIRKHAN, 2004), de modo remoto, sem contato físico direto com as folhas das plantas.

A maior parte dos trabalhos que utilizam essa técnica aplicam os resultados das medições de temperatura no cálculo de índices, como o *Crop Water Stress Index* (CSWI), correlacionado-o com o nível de irrigação (IDSO et al., 1980). Jamali e Ansari (2022) em trabalho realizado com quinoa calculando o CSWI a partir de quatro níveis de irrigação, concluíram que maiores valores do índice estão ligados a menores valores de rendimento, e lâminas de déficit, podendo o CSWI ser utilizado no planejamento da irrigação. Alguns trabalhos semelhantes foram desenvolvidos para culturas distintas: Alderfasi e Nielsen (2001), e Gontia e Tiwari (2008) utilizaram a diferença de temperatura entre o ar e o dossel da cultura do trigo obtida através de termometria por infravermelho para cálculo do CSWI, determinando equações e planejamento da irrigação; Fattahi et al. (2018) relacionaram o CSWI com cinco lâminas de irrigação para programar a irrigação do milho; com a mesma cultura, Pradawet et al. (2022) relacionam temperatura foliar ao CSWI para detecção de estresse hídrico.

Apesar da quantidade expressiva de trabalhos que relacionam a diferença entre temperatura da superfície foliar e o ar circundante do dossel com o nível de deficiência hídrica

na área plantada, ênfase tem sido dada também para o cálculo de índices de estresse hídrico (ex: CWSI), que permitem normalizar as recomendações para regiões climaticamente diferentes das áreas experimentais.

Manejos de irrigação

A irrigação se tornou uma ferramenta fundamental na agricultura, tendo como objetivo principal fornecer às plantas um fluxo contínuo de água de acordo com a necessidade de absorção delas (COELHO *et al.*, 2011). Estimativas da FAO apontam que para uma população de 9 bilhões de habitantes em 2050, a produção de alimentos precisa ser expandida em 60%, sendo que 90% desse valor deverá corresponder a um aumento de produtividade e somente 10% de expansão de áreas (BERNARDO *et al.*, 2019). Dessa maneira, o desenvolvimento da agricultura irrigada brasileira é uma grande aliada para que as demandas alimentares futuras sejam atendidas.

A água é um recurso natural limitado de valor inestimável, sendo essencial para desenvolvimento e sobrevivência, e que tem tido sua disponibilidade diminuída de maneira gradativa em função do crescimento populacional, agrícola e industrial, resultando muitas vezes em degradação do meio ambiente por não ser possível manter níveis mínimos de fluxos em determinadas microbacias (BRASIL, 1997). Dessa maneira, a única forma viável de expansão da agricultura irrigada é através de um caminho sustentável, usando técnicas racionais de manejo de irrigação e conhecendo as principais características delas para as decisões de quanto e quando irrigar (CARVALHO; OLIVEIRA, 2012).

A quantidade de água necessária a ser aplicada pode ser definida pelo monitoramento da cultura, das condições atmosféricas ou pelo conteúdo de água do solo, considerando a eficiência do sistema de irrigação adotado e a capacidade de armazenamento de água no solo (JAMES, 1988). De acordo com Bernardo *et al.* (2019), o momento de início da irrigação pode ser definido através do monitoramento da deficiência de água no dossel das plantas, da evapotranspiração do ambiente e da umidade do perfil do solo.

Considerando esses fatores, uma técnica bastante utilizada para manejo da irrigação é o balanço hídrico climatológico, que estima periodicamente o teor de água do solo através do balanço de entradas e saídas de água no volume de solo explorado pelas raízes (OLIVEIRA *et al.*, 2005; ANDRADE, 2012). As entradas de água são através da precipitação e irrigação e as saídas são originadas da evapotranspiração (estação meteorológica), escoamento superficial ou percolação, sendo esses os principais quesitos do balanço hídrico. Dessa contabilização é feita

uma estimativa da lâmina de irrigação a ser aplicada, mantendo o conteúdo de água do solo sempre adequado aos limites e necessidades da planta (LIBARDI, 2005; LIMA; SANTOS, 2009).

Muitos estudos vêm sendo realizados para avaliar estratégias de irrigação em termos de reposição plena ou deficitária de água para a cultura irrigada. A irrigação com déficit hídrico controlado em períodos não críticos do desenvolvimento da planta (onde a produção não é prejudicada pelo déficit hídrico), promove uma reposição hídrica ao solo inferior à lâmina evapotranspirada pela cultura no campo irrigado (FRIZZONE, 2007; FRANÇÓIS, 2012). Nesse tipo de manejo o principal objetivo é otimizar a produção da cultura por volume de água utilizado e viabilizar o cultivo em locais com registros históricos de precipitação inferior ao volume de água necessário para a atividade agrícola (PIMENTEL, 2012). Gava et al. (2016) trabalhando com a cultura da soja sob irrigação com déficit hídrico controlado concluíram que é possível utilizar esse manejo em períodos estratégicos do desenvolvimento da cultura sem prejudicar a produtividade por unidade de área de modo significativo.

Outro exemplo de manejo eficiente da irrigação é o monitoramento indireto da umidade do solo através de tensiômetros. Essa técnica consiste em medir a força com a qual a água está retida no solo, conhecida como tensão da água no solo, e que varia de acordo com o teor de umidade no solo (SILVA et al., 1999). De forma geral, quanto menor o conteúdo de água no solo, maior será a tensão da água no mesmo, relação esta estimada pela curva de retenção, determinada em laboratório. Os sensores do tipo tensiômetros são bem difundidos no manejo tecnificado da irrigação (HEERMAAN et al., 1990), tendo sido idealizados por Gardner em 1922. O sucesso deste equipamento no campo, deve-se ao fato de medirem diretamente a tensão da água no solo, sem a necessitando de calibração em função do tipo de solo (CAMARGO et al., 1982; CAMPBELL; MULLA, 1990).

Além das metodologias mencionadas anteriormente, são diversas as opções de manejo de irrigação que podem ser utilizadas usando um ou vários parâmetros do sistema solo-planta-atmosfera, sendo monitorados via solo, via clima e/ou via planta. De acordo com Bernardo et al. (2019), a escolha do manejo racional de um projeto de irrigação deve considerar aspectos sociais, ecológicos e econômicos da região e do irrigante. Um desafio para a agricultura é realizar o uso eficiente desse recurso, uma vez que a irrigação se torna cada vez mais necessária em decorrência do aumento da demanda alimentar e mudanças climáticas. Assim, a busca por alternativas de manejo adequadas de acordo com a realidade do produtor é uma forma de racionalizar o uso da irrigação, bem como proporcionar um aumento da eficiência de uso da

água, reduzindo custos de energia e aumentando da chamada produtividade da água (DU et al., 2015).

2.5. Produtividade da água x eficiência do uso da água

Tradicionalmente, a principal forma de validar a adoção de um sistema de irrigação é através da produção obtida, sendo o principal objetivo a otimização da produtividade das culturas. Entretanto, em virtude da mudança de visão quanto aos recursos naturais, a conscientização do desenvolvimento de uma agricultura sustentável e a maior atenção aos custos de produção, que incluem a irrigação, trazem como forma de avaliação dois outros importantes conceitos: a eficiência do uso da água e a produtividade da água (CUNHA et al., 2014); esses dois termos tem sido usados como sinônimos na literatura e têm por objetivo relacionar a produção obtida em quilogramas por volume de água evapotranspirado ao longo do ciclo produtivo, sendo calculado geralmente em kg m^{-3} (BRITO, 2007).

Fatores como a tomada de decisão do irrigante, diferentes manejos e sistemas de irrigação podem influenciar os resultados da produtividade da água (WEBBER, 2006; COELHO, 2022). Devido a isso, as variações dos valores de referência para esse parâmetro dificultam o estabelecimento de relações entre a produtividade da água, respostas biométricas e fisiológicas (ALMEIDA, 2021). Campos et al. (2018) através de estudo com sensoriamento remoto encontraram correlação entre eficiência do uso da água e produtividade, no estágio vegetativo da cultura da soja. Gajić et al. (2018) em pesquisa com diferentes lâminas de reposição concluíram que o tratamento com maior produção de soja também possuiu maior produtividade da água. Fried et al. (2019) avaliando o comportamento de diferentes genótipos de soja sob condições irrigadas e de sequeiro observaram correlação entre genótipos de alto rendimento e maiores valores de eficiência do uso da água. Almeida (2021) em estudo avaliando esse parâmetro e a resposta termal da cultura da soja sob diferentes níveis de reposição hídrica, concluiu que à medida que a reposição hídrica do solo diminuiu ocorreu maior valor da eficiência do uso da água.

Dessa maneira, a produtividade da água pode ser um fator determinante na avaliação de um manejo de irrigação, abordando parâmetros econômicos e ambientais. A hipótese desse trabalho é que diferentes manejos de irrigação possuem impactos distintos em parâmetros fisiológicos, de rendimento e na produtividade da água, para diferentes variedades de soja.

3. OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho foi avaliar diferentes estratégias de manejo de irrigação na cultura da soja (via solo, clima e planta) em três variedades de soja, e os impactos nos parâmetros fisiológicos, de rendimento e produtividade da água.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Área experimental

O experimento foi realizado em ambiente protegido, no Departamento de Engenharia de Biosistemas (LEB), localizado na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” em Piracicaba, São Paulo (22°43'30” Sul e 47°37'00” Oeste). Foram utilizados vasos de concreto armado subdivididos em 3 partes iguais totalizando 396 parcelas de aproximadamente 0,33m² cada (Figura 4). Cada vaso recebeu um manejo de irrigação e cada subdivisão um cultivar de soja.



Figura 4. Local de realização do experimento. Fonte: Barbora 2015.

O clima da região de acordo com Koppen é classificado como cwa: subtropical úmido com chuvas concentradas no verão e inverno seco. O solo utilizado caracteriza-se como um Latossolo Vermelho Amarelo de textura franco-arenosa, da série Sertãozinho.

4.2. Condução da cultura

O plantio foi realizado no dia 24 de outubro de 2020, sendo elas: TMG 7067 (V1), 58i60RFSF IPRO (V2) e NA 5909 (V3), com sementes previamente tratadas com fungicida e micronutrientes, na densidade de 10, 13 e 15 plantas por metro linear, respectivamente, seguindo as orientações das empresas de sementes. V1 apresenta hábito de crescimento semideterminado e pertence ao grupo de maturidade 7.2 (Zuffo et al., 2022), já V2 possui

crescimento indeterminado, pertencendo ao grupo de maturidade 5.8 (Chechi et al., 2020). Assim como V2, V3 possui crescimento indeterminado e estabilidade ante a variações de solo e clima, sendo do grupo de maturidade 6.2 (Durlí et al., 2022). As três variedades apresentam um ciclo super precoce, alto potencial de rendimento e são cultivadas na região Sudeste do Brasil.

No pré-plantio foi aplicado inoculante turfoso com a bactéria do gênero *Bradyrhizobium* para a produção de nódulos e fixação biológica de nitrogênio. Antes da semeadura foi feita análise química do solo (Tabela 3) para a correção da fertilidade de acordo com a necessidade nutricional da cultura e planejamento da adubação.

Tabela 3. Resultado da análise de solo de macro e micronutrientes

	pH	M.O	S	P	K	SB	CTC	V%	m%
Profundidade (cm)	-	g.dm ⁻³	mg.dm ⁻³	mg.dm ⁻³	-----	mmol _c dm ⁻³	-----	-	-
0 – 20	5.1	11	100	44	1.0	44	75	59	2
20 – 40	5.3	11	25	35	0.6	38	63	60	0
	Ca	Mg	H+Al	Al	Cu	Fe	Zn	Mn	B
Profundidade (cm)	-----	mmol _c dm ⁻³	-----	-----	-----	mg/dm ³	-----	-----	-----
0 – 20	33	10	31	1	1	21	21	21	0.3
20 – 40	30	7	25	0	1	13	4	13	0.2

Para a adubação de plantio foi utilizado P₂O₅ na dosagem de 200 kg ha⁻¹, equivalente a 9 g por metro linear. A aplicação foi realizada no sulco de plantio a 5 cm de profundidade abaixo das sementes, que foram semeadas a 3 cm de profundidade no solo (Figura 5). A adubação de cobertura foi feita com K₂O diluído em água seguindo a dosagem de 100 kg ha⁻¹, convertido em 1,43 g por parcela. Foram realizadas três aplicações a partir do estágio V1 com intervalo de 10 dias entre cada uma. A adubação foi baseada nas indicações de van Raij (1997) para a cultura da soja. A adubação foliar seguiu o programa nutricional Supera, da empresa Compass Minerals, com aplicação de micronutrientes nos estádios V4, R1 e R3



Figura 5. A-C: Plantio. A: tratamento de sementes; B: adubação de plantio; C: semeadura.

Ao longo do experimento o controle de plantas daninhas foi realizado de forma manual de acordo com a necessidade de retirada das plantas invasoras. Devido a um experimento anterior com a cultura do feijão, o manejo fitossanitário foi um ponto crítico durante toda a duração do experimento. Aplicações de produtos para pragas como mosca-branca (*Bemisia tabaci*), lagarta-da-soja (*Anticarsia gemmatilis*) e mosca-minadora (*Liriomyza huidobrensis*) foram necessárias ao longo do ciclo da cultura (Figura 6).



Figura 6. A-B: Pragas ao longo do ciclo da cultura da soja. A: lagarta-da-soja (círculo superior) e mosca-branca (círculo inferior). B: injúria causada por mosca-minadora (círculo).

O experimento contou com um sistema de irrigação localizada composto por emissores autocompensados, distribuídos em linhas de 1 metro linear por parcela contendo 6 emissores

com espaçamento de 0,15 metros e vazão de $0,6 \text{ L.h}^{-1}$, sendo no total $3,6 \text{ L.h}^{-1}$ (Figura 6). A irrigação de cada parcela foi controlada de maneira individual, de acordo com cada tratamento.

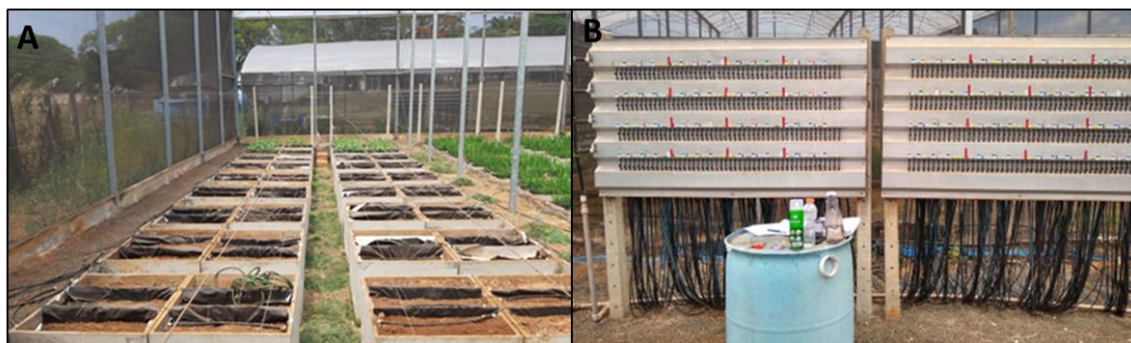


Figura 7. Emissores. A: Ajuste dos emissores em cada parcela experimental. B: painel de controle da irrigação.

Durante os primeiros 20 dias após a semeadura foi realizado manejo da irrigação com reposição através da evapotranspiração da cultura (ET_c), utilizando para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o) a equação de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), com um K_c de 0,4. Os parâmetros de temperatura do ar e umidade relativa do ar foram medidos por um sensor Vaisala HMP45C-L12 e a radiação solar global através de um piranômetro modelo LO02-L12 (Campbell Scientific, Utah, USA). Esses parâmetros foram aferidos por uma estação meteorológica, fixada dentro da estufa a 2 m do dossel da cultura, a cada 10 minutos, registrados com o auxílio de um data-logger CR1000 Campbell Scientific. As variedades V1, V2 e V3 apresentaram ciclo de 120, 110 e 116 dias, respectivamente.

4.3. Tratamentos adotados e delineamento experimental

Ao 21º dia foram iniciados os três diferentes manejos de irrigação (M), sendo: MS manejo via solo, baseado no potencial matricial do solo; MC via clima, através da evapotranspiração e balanço hídrico do solo e; MP, via planta, baseado na temperatura do dossel da cultura. A Figura 7 apresenta as características das plantas ao início dos tratamentos e mais detalhes das plantas durante o experimento podem ser observados no tópico Apêndices.



Figura 8. A-C. Início dos manejos de irrigação. A: V2; B: V1; C: V3.

O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado em parcelas subdivididas, sendo as parcelas formadas pelo manejo de irrigação e as subparcelas cada variedade (V). Dessa maneira, um total de 9 combinações entre manejos e variedades foram geradas com 5 repetições, totalizando em 45 parcelas experimentais. O croqui experimental pode ser visualizado na Figura 8.

		BO	BO
		2	BO
BO	BO	5	8
3	5	6	1
6	2	9	7
9	8	3	4
8	4	6	5
5	7	3	8
2	1	9	2
6	5	1	3
3	8	4	9
9	2	7	6
	1		4
	7		7
	4		1

LEGENDA	
Tratamentos	n°
V1 M1	1
V1 M2	2
V1 M3	3
V2 M1	4
V2 M2	5
V2 M3	6
V3 M1	7
V3 M2	8
V3 M3	9

Figura 9. Croqui experimental. BO: parcelas de bordadura.

4.4. Irrigação

4.4.1. Manejo da irrigação via tensiometria

O primeiro manejo de irrigação foi realizado com base em dados de umidade do solo obtidos indiretamente com o auxílio de tensiômetros. Esses instrumentos foram instalados a 0,10 e 0,30 m para registros de umidade em 2 camadas de solo distintas: 0,00 – 0,20 e 0,20 – 0,40 m. As leituras foram realizadas no período das 6:00 às 7:00 da manhã, quando a temperatura do ambiente possui menor interferência nos dados, com o auxílio de um tensímetro digital. A irrigação foi realizada quando o potencial matricial do solo atingiu cerca de -20 kPa a 0,10 m de profundidade, de acordo com Bellaloui et al. (2021). Os valores coletados foram plotados em uma planilha no software Microsoft Excel, sendo transformados em potencial matricial da água no solo (Ψ_m) por meio da Equação 1, onde foi subtraído o valor equivalente a pressão da coluna d'água no tensiômetro para cada profundidade de instalação.

$$\Psi_m = L_t - h_c \quad (1)$$

Ψ_m : potencial matricial da água no solo (kPa);

L_t : leitura do tensiômetro ou tensão da água no solo (kPa);

h_c : pressão equivalente à altura da coluna d'água no tensiômetro (kPa).

Na sequência, por meio do modelo proposto por Van Genuchten (1980), a partir da média para cada camada de solo e cada variedade referente a leitura do Ψ_m , foi estimada a umidade do solo em $m^3 m^{-3}$ através a Equação 2. Os parâmetros do solo utilizados no cálculo estão presentes da Tabela 4.

Tabela 4. Valores de umidade de saturação (Θ_s), residual (Θ_r), e dos parâmetros empíricos (α , m e n) do modelo de van Genuchten (1980)

Camada (m)	Θ_s ($cm^3 cm^{-3}$)	Θ_r ($cm^3 cm^{-3}$)	α (kPa^{-1})	m	n
0,00 – 0,20	0,421	0,098	1,3464	0,1799	2,7175
0,20 – 0,40	0,412	0,085	1,5708	0,1648	2,5028
0,40 – 0,60	0,374	0,122	1,1291	0,2749	1,5619

Adaptado de Barbosa (2015).

$$\Theta(\Psi_m) = \Theta_r + \frac{(\Theta_s + \Theta_r)}{[1 + (\alpha * |\Psi_m|)^n]^m} \quad (2)$$

$\Theta(\Psi_m)$: umidade volumétrica em função do potencial mátrico em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

Θ_r : umidade volumétrica residual do solo em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

Θ_s : umidade volumétrica do solo saturado, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

m e n : parâmetros de regressão, adimensionais;

α : parâmetro com dimensão igual ao inverso da tensão, em kPa^{-1} ;

Ψ_m : potencial mátrico em kPa.

Com o uso desses fatores e dos dados físico-hídricos do solo, por meio da Equação 3 foram calculadas as lâminas de irrigação necessárias correspondentes a cada tratamento para elevar a umidade à capacidade de campo.

$$L_x = (\Theta_{cc} - \Theta) * Z \quad (3)$$

L_x : lâmina necessária para elevar a umidade da camada x até a capacidade de campo, em mm;

Θ_{cc} : umidade volumétrica na capacidade de campo para a camada x , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

Θ : umidade volumétrica atual estimada para a camada x , em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

Z : espessura da camada x , em mm.

O somatório das lâminas, levando em conta a profundidade do sistema radicular ao longo do desenvolvimento da cultura, constituiu a lâmina total a ser aplicada por tratamento em cada irrigação. O tempo de irrigação foi calculado considerando a vazão e volume de cada parcela (Equação 4).

$$TI = \frac{LI * A}{Q} * 60 \quad (4)$$

TI : tempo de irrigação, em minutos;

LI : lâmina de irrigação necessária para elevar a umidade do solo até a capacidade de campo, em mm;

A : área de solo da parcela, em m^2 ;

Q : vazão do sistema, em L h^{-1} .

4.4.2. Manejo da irrigação via balanço hídrico do solo

Para o manejo da irrigação via balanço hídrico do solo foi utilizada a equação de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) para a determinação da E_{To} , através dos parâmetros obtidos na estação meteorológica instalada no interior da estufa. Os coeficientes de cultura (K_c)

adotados ao longo do cultivo, que multiplicados pela E_{To} resultaram no valor da E_{Tc} , estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5. Coeficientes de cultura (K_c) adotados ao longo do ciclo produtivo da soja

Fases	Duração (dias)	K_c
I	20	0.4
II	25	0.8
III	10	0.87
	5	1
IV	30	1.2
	10	0.97
V	20	0.7

Adaptado de Allen et al. 1998.

Os parâmetros físico-hídricos do solo usados para o cálculo da capacidade de água disponível (CAD) em mm estão presentes na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros físico-hídricos do solo

Camada (cm)	Θ_{cc} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	Θ_{pmp} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	D_s (g cm^{-3})	D_p (g cm^{-3})
0,00 – 0,20	0,227	0,106	1,53	2,65
0,20 – 0,40	0,226	0,098	1,50	2,65
0,40 – 0,60	0,241	0,132	1,69	2,64

Θ_{cc} : umidade na capacidade de campo referente ao potencial mátrico (Ψ_m) de -4,85 kPa; Θ_{pmp} : umidade no ponto de murcha permanente referente ao potencial mátrico (Ψ_m) de -1500 kPa; D_s : densidade do solo; D_p : densidade de partículas do solo.

Para o manejo desse tratamento de balanço hídrico foi simulado o crescimento radicular ao longo do ciclo de cultivo, como descrito na Tabela 7.

Tabela 7. Profundidade adotada para cálculo em função do crescimento da soja

Fases	Duração (dias)	Profundidade adotada Z (cm)	Dias após plantio
I	20	20	20
II	25	25	45
	5	30	55
	5	30	60
	5	30	65
III	5	30	70
	5	30	75
	5	30	80
	5	30	80
IV	10	40	90
V	35	40	100

O turno de rega adotado foi do tipo variável, possuindo como ponto de partida para a irrigação o fator de disponibilidade de água no solo (f) para a cultura da soja de 0,5. Dessa forma, a irrigação foi realizada sempre que o volume de água da camada se aproximava do esgotamento da água facilmente disponível no perfil de solo.

4.4.3. Manejo da irrigação via temperatura do dossel

A temperatura do dossel da cultura foi registrada com auxílio de um sensor infravermelho portátil modelo TIV 6500 Vonder. As medições foram efetuadas no período de 10:30 às 11:30 da manhã sob condições meteorológicas de luz plena, em folhas totalmente expostas a luz solar, com angulação semelhante a esta em relação ao plano vertical. Após o registro manual da temperatura foliar nas parcelas avaliadas, os dados foram transferidos para uma planilha Microsoft Excel, onde foi calculada a diferença entre a temperatura do dossel da cultura e temperatura do ar, obtida através da estação meteorológica no interior da estufa, denominada (ΔT).

$$\Delta T = T_c - T_{ar} \quad (5)$$

ΔT : diferença entre temperatura do ar e temperatura do dossel da cultura, em °C;

T_{ar}: temperatura do ar, em °C;

T_c: temperatura medida do dossel da cultura, em °C.

A irrigação foi realizada quando o ΔT médio foi igual ou superior a 2 °C. A lâmina de irrigação foi determinada com base no acompanhamento da evapotranspiração da cultura através do manejo via balanço hídrico.

4.5. Avaliações

4.5.1. Avaliações biométricas e de produtividade

Após a colheita uma subamostra da parte central das parcelas foi coletada para análise de componentes vegetativos e reprodutivos. Uma fita métrica flexível e um paquímetro digital foram utilizados para medir a altura de plantas (AP) e o diâmetro do caule (DC). Além disso, foi realizada a contagem de número de nós por planta (NNP) e número de vagens por planta (NVP).

As plantas foram submetidas a secagem em estufa de circulação forçada de ar durante 72 horas. Os componentes vegetativos e reprodutivos foram pesados em uma balança de precisão para obter a massa seca vegetal (MSV), massa seca de grãos (MSG) e massa de 100 grãos (P100). O rendimento de grãos foi ajustado para 130 g kg⁻¹ de umidade e escalonado para Mg ha⁻¹.

No máximo desenvolvimento da parte vegetativa foram coletadas duas plantas por parcela para determinação do índice de área foliar (IAF), utilizando o equipamento LI-3100C (LiCOR-Inc, Lincoln, Nebraska, EUA).

A produtividade da água (PA) foi determinada de acordo com a Equação 6, utilizando dados de produtividade e volume de água aplicado em cada tratamento.

$$PA = \frac{P}{V} \quad (6)$$

PA: produtividade da água, em $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;

P: produção de grãos, em kg;

V: volume total de água aplicado por tratamento, em m^3 , considerando que o perfil de umidade inicial do solo é igual ao perfil de umidade final do solo nas parcelas

4.5.2. Avaliações fisiológicas

As avaliações fisiológicas de desempenho dos tratamentos foram realizadas aos 16 (final do estágio vegetativo) e 35 (início da floração) dias após início dos diferentes manejos de irrigação. Os parâmetros de troca de gasosa: taxa fotossintética (A, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiração (E, $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (gs, $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e eficiência intrínseca do uso da água (iEUA, obtida através da divisão A/gs); e potencial hídrico foliar foram medidos em folhas totalmente expandidas expostas ao sol.

Os parâmetros de troca de gás foram medidos utilizando um sistema portátil de avaliação de trocas gasosas, o equipamento IRGA (Infra-Red Gas Analyser) modelo Li-6400 XT (LiCOR-Inc), no período das 9:00 às 11:00 h, em dias com ausência de nuvens. O equipamento foi programado com concentração de CO_2 de $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$ na câmara foliar e $1000 \mu\text{mol mol}^{-1}$ [quanta] $\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para densidade do fluxo fotônico. A iEUA foi calculada usando os valores de A e gs.

Em sincronia com a análise IRGA foi utilizada uma câmara de pressão de Scholander (modelo 3005, Soil Moisture Equipment Corporation) para avaliação do potencial hídrico foliar, no período das 2:00 às 4:00 da manhã, em ausência de luz solar (Figura 9). As folhas utilizadas na análise foram cobertas com folha de alumínio e colocadas em recipientes frios para serem processadas em laboratório o mais rápido possível.



Figura 10. A-D. Análises ao longo do ciclo da soja. A: equipamento IRGA posicionado em campo; B: leitura do equipamento IRGA na cultura da soja; C: coleta de amostras para análise em câmara de Scholander; D: câmara de Scholander.

Os valores médios dos parâmetros fisiológicos nas diferentes datas de medição foram utilizados para realizar a análise de variância para avaliar os efeitos dos tratamentos.

4.6. Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o R Studio versão 4.1.2. Os testes Shapiro-Wilk e Levene foram usados para a estimativa da normalidade e homogeneidade da variância. Os efeitos do manejo da irrigação e variedade foram avaliados nos níveis 0,05 e 0,01 de probabilidade usando o teste F.

As médias das variáveis com um valor significativo no teste F foram comparadas usando o teste de diferença mínima significativa de Fisher (LSD) no nível de 0,05 de probabilidade. A Análise de Componentes Principais (Principal Component Analysis, PCA) foi usada para gerar biplots para mostrar a relação entre as variedades e as variáveis avaliadas sob os diferentes manejos de irrigação adotados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Parâmetros meteorológicos

Os dados de temperatura máxima, mínima e média coletados ao longo do experimento através da estação meteorológica no interior da estufa são apresentados na Figura 10. A temperatura média diária ao longo do experimento variou entre 20,1 e 29,9 °C, dentro da faixa ideal para o bom desenvolvimento da cultura da soja (Farias et al., 2007).

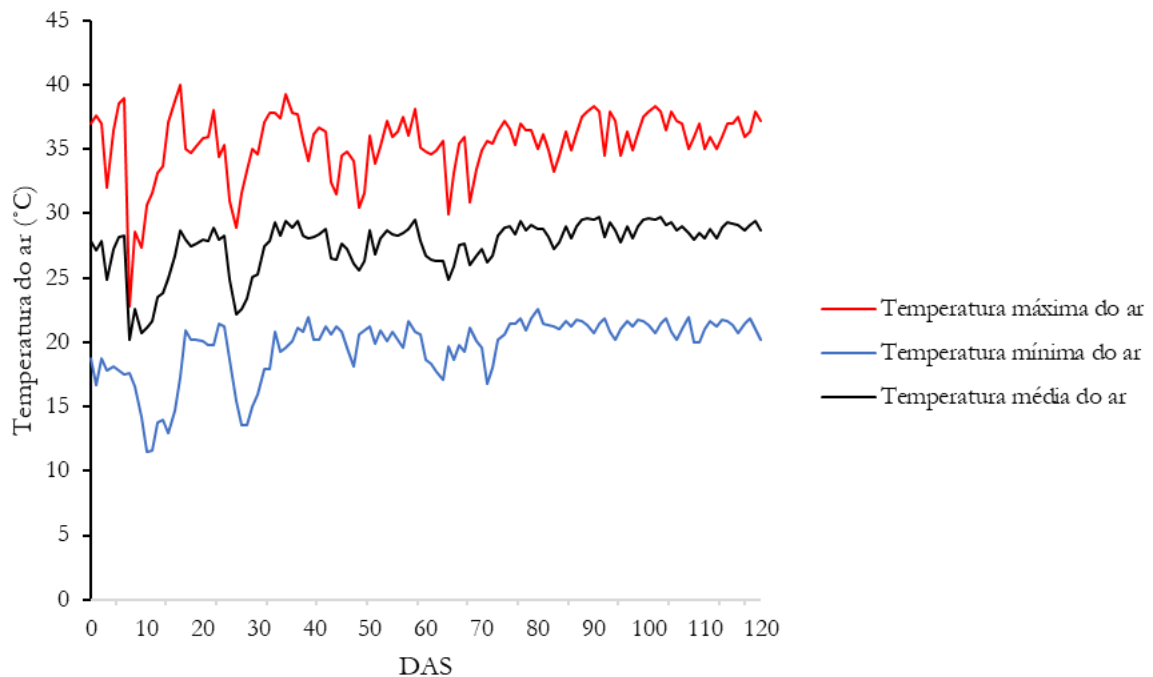


Figura 11. Valores diários da temperatura máxima, mínima e média do ar obtidas pela estação meteorológica instalada a 2 m do dossel da cultura no interior da estufa ao longo do experimento.

As médias mensais dos demais parâmetros meteorológicos de radiação solar (RS), umidade relativa do ar (UR) e evapotranspiração de referência calculada pelo método de Penman-Monteith (ET_o) são apresentadas na Tabela 8. A temperatura máxima e mínima também são expressas da mesma maneira. Os valores médios gerais para todo o experimento foram: temperatura máxima de 35,5 °C, temperatura mínima de 18,7 °C, radiação solar de 10,9 MJ m⁻² dia⁻¹, 67,9 % de umidade relativa, e ET_o 3,9 mm dia⁻¹.

Tabela 8. Valores mensais e médios dos dados meteorológicos registrados pela estação meteorológica no interior da estufa ao longo do experimento

Mês	Temperatura (°C)		Radiação solar (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	Umidade relativa média (%)	ETo PM56 (mm dia ⁻¹)
	Máxima	Mínima			
Outubro	35,4	18,5	10,1	65,3	3,7
Novembro	35,0	17,3	12,9	66,5	4,4
Dezembro	34,8	20,1	11,2	74,0	3,8
Janeiro	35,7	21,0	10,8	74,3	3,8
Média	35,5	18,7	10,9	67,9	3,9

5.2. Manejos de irrigação e demanda hídrica

A Tabela 9 apresenta o resumo do consumo de água e número de eventos de irrigação para cada estágio de desenvolvimento das variedades de soja submetidas aos manejos de irrigação. O consumo médio de água para as variedades sob o manejo MS foi 42 e 49% maior do que MC e MP, respectivamente. Aproximadamente 85% do volume de água foi aplicado durante os estágios II e III, e a variedade V1 exigiu alta frequência e quantidade de irrigação.

Tabela 9. Resumo do consumo de água e número de eventos de irrigação para cada estágio de desenvolvimento das variedades de soja submetidas aos manejos de irrigação

	Estágio de desenvolvimento	Manejos de irrigação								
		MS			MC			MP		
		V1	V2	V3	V1	V2	V3	V1	V2	V3
Consumo de água (mm)	I	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	II	166	60	131	90	90	90	65	65	65
	III	563	378	373	213	213	213	186	186	186
	IV	57	57	54	25	25	25	29	29	29
	Total	786	496	559	358	358	358	310	310	310
Número de eventos de irrigação	I	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	II	7	5	6	5	5	5	3	3	3
	III	19	14	13	10	10	10	14	11	12
	IV	2	2	2	1	1	1	1	1	2
	Total	48	41	41	36	36	36	38	35	37

MS: manejo via solo, baseado do potencial matricial do solo; MC: manejo via clima, baseado no balanço hídrico do solo; MP: manejo via planta, baseado na temperatura do dossel da cultura; V1: variedade TMG 7067; V2: variedade 58i60RSF IPRO; V3: variedade NA 5909; I: 0 a 20 DAS; II: 21 a 55 DAS; III: 56 a 90 DAS; IV: 91 a 120 DAS. Adaptado de Allen et al. (1998).

A Figura 12 apresenta os dados médios diários de tensão da água no solo em kPa nas profundidades de 0 – 20 e 20 – 40 cm para as três variedades utilizadas, obtidos através dos tensiômetros instalados para o manejo MS. A frequência de irrigação seguiu a necessidade hídrica da cultura, de acordo com o seu desenvolvimento, sendo reduzida nos estádios iniciais devido a menor taxa evapotranspirativa por uma menor quantidade de folhas e raízes.

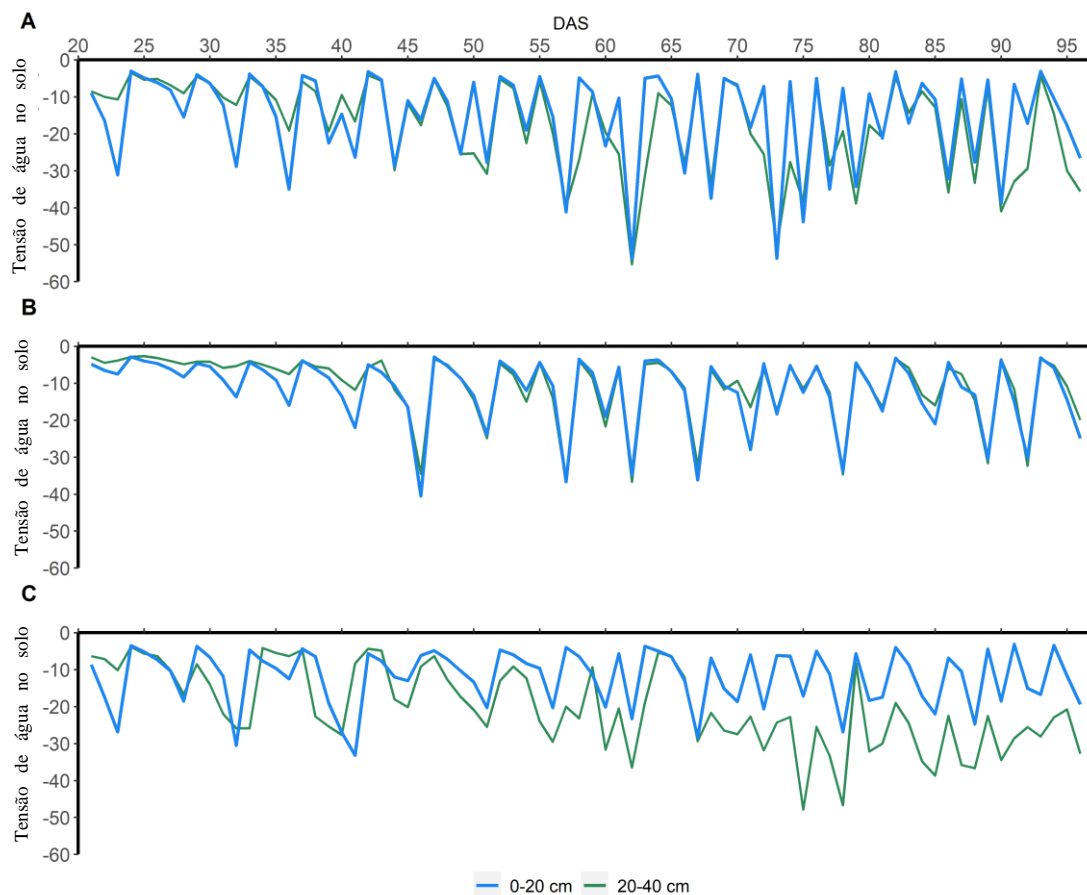


Figura 12. Registros médios diários de tensão da água no solo ao longo do ciclo da cultura da soja para o tratamento MS. A: TMG 7067. B: 58i60RSF IPRO. C: NA 5909.

O volume total de água aplicado via irrigação para V1, V2 e V3 foi de 786, 496 e 559 mm, respectivamente com uma média de 43 eventos de irrigação. Esses resultados estão dentro da necessidade hídrica média da soja, de 450 a 800 mm de água por ciclo, que varia de acordo com a localidade de plantio, a cultivar escolhida, o sistema de cultivo adotado e o volume de solo explorado pelas raízes (FEITOSA *et al.*, 2010; EMBRAPA, 2011; LUDWIG *et al.*, 2011).

O manejo MC apresentou um volume médio total de água aplicado via irrigação para as 3 variedades de 358 mm, devido a um mesmo K_c adotado, com média de 36 eventos de irrigação. Ao comparar a quantidade de água aplicada com o manejo anterior, principalmente

observando a diferença de consumo de água entre as variedades adotadas (496 a 786 mm), o menor volume de água aplicado em MC sugere que esse manejo estava subestimando a necessidade hídrica da cultura da soja nas condições ensaiadas. Em experimento realizado no Sudeste do Brasil, Silva et al. (2019) concluíram que para uma ETo entre 2 e 4 mm, os valores de Kc são maiores do que os valores adotados no presente estudo (FAO-56). Isso demonstrou que a adoção de valores universais de Kc resulta em um manejo inadequado da irrigação (MARIN; ANGELOCCI, 2011; SEGOVIA-CARDOZO et al., 2019; SOBENKO et al., 2019). Os valores de Kc devem ser calibrados para cada variedade de soja em cada condição de plantio estabelecida; a calibração desses valores deve ser feita através de lisímetros, sensores de umidade do solo, equipamentos de razão de Bowen ou de Eddy Covariance.

Para o manejo MP, os registros médios diários da diferença de temperatura do ar e do dossel da cultura ao longo do experimento são apresentados na Figura 12. A linha vermelha representa a média das leituras diárias de ΔT , enquanto as linhas tracejadas indicam o limite inferior e superior para a condição avaliada, ou seja, ΔT de 2 °C. A linha que representa o valor 0 equivale ao limite inferior e abaixo dela estão os registros onde a temperatura do ar foi superior a temperatura do dossel da cultura, enquanto a linha tracejada ligada ao valor 2 indica o limite superior. Acima dessa condição, a temperatura do dossel da cultura foi superior a temperatura do ar em 2 °C, sendo o ponto de partida para a irrigação.

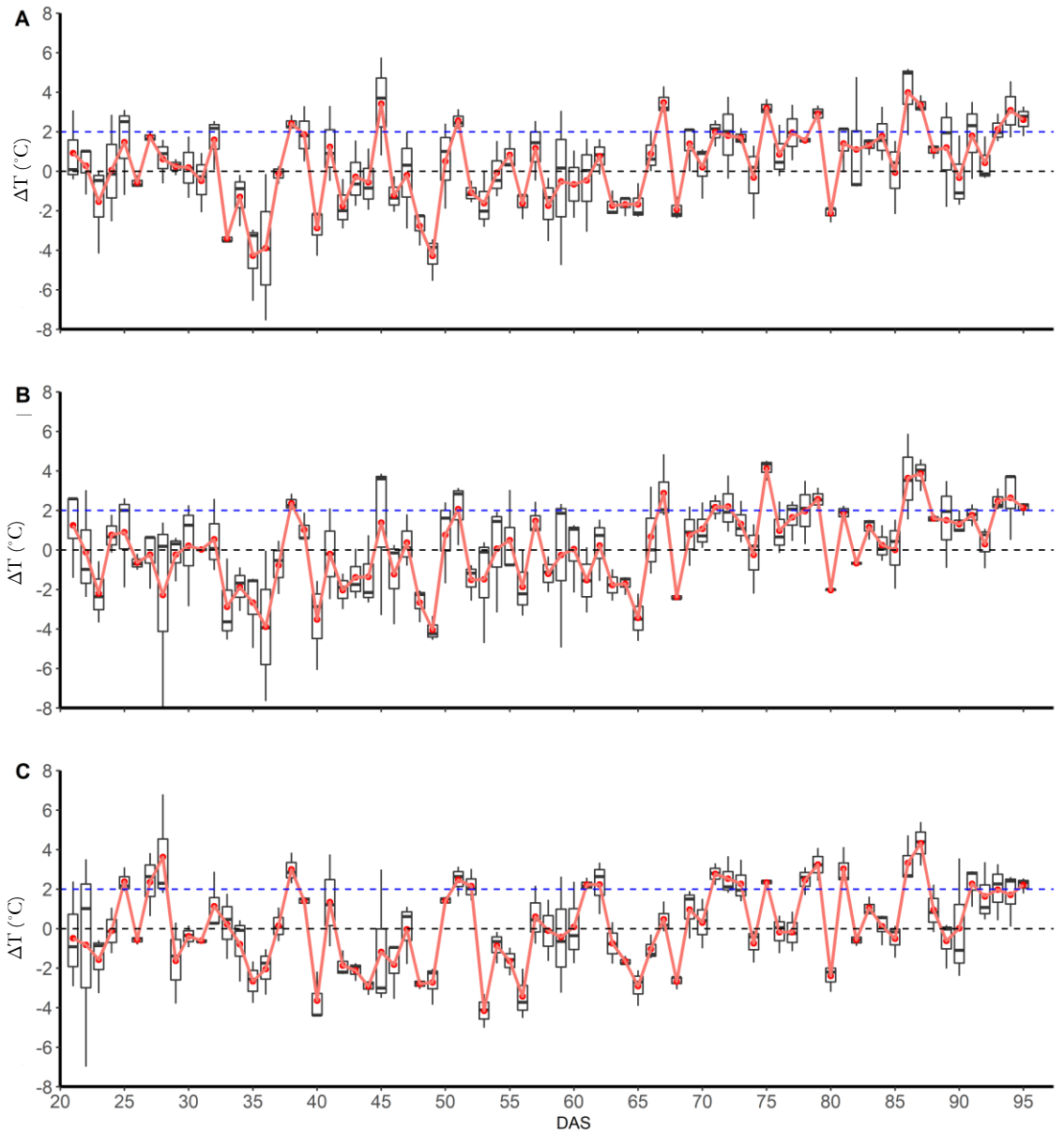


Figura 13. Registros médios diários da diferença entre temperatura do ar e do dossel da cultura ΔT em $^{\circ}\text{C}$ ao longo do ciclo da cultura da soja para o tratamento MP. A: TMG 7067; B: 58i60RSF IPRO; C: NA 5909.

O volume total de água aplicado via irrigação para V1, V2 e V3 sob MP foi de 309 mm, como os valores de K_c adotados para as três variedades foram idênticos, sendo a principal diferença entre os manejos a variação de ΔT e o momento de início da irrigação. Para esse manejo ocorreu uma média de 36 eventos de irrigação.

5.3. Efeito dos manejos de irrigação nas respostas fisiológicas

Os manejos de irrigação foram significativos para taxa fotossintética (A), condutância estomática (gs), transpiração (E) e eficiência intrínseca do uso da água (iEUA), entretanto, para

variedade foi significativo apenas para g_s e E. A interação entre manejos de irrigação e variedade foi significativa para g_s e potencial hídrico foliar (Ψ hídrico). Os resultados das análises no período vegetativo e reprodutivo apresentaram valores semelhantes devido à época de realização, portanto, os resultados médios dos parâmetros fisiológicos podem ser visualizados na Tabela 10. Os resultados separados por estágio de desenvolvimento podem ser verificados no tópico Apêndices.

Para o manejo MP A foi significativamente menor em relação a MC e MS. Em contrapartida, para iEUA MP foi significativamente maior do que os demais. Para esses dois parâmetros não houve diferença significativa entre as variedades. A variável E seguiu tendência semelhante ao anterior, entretanto, houve diferença significativa para variedade, com V3 apresentando valores reduzidos em comparação com V1 e V2. MS apresentou valores maiores de g_s para V1 e V3 quando comparado a MC, enquanto MP apresentou médias reduzidas para todas as variedades. O potencial hídrico foliar seguiu tendência semelhante ao parâmetro anterior, porém com V1 apresentando média reduzida em MS e V2 não apresentando mudanças para MC e MP.

O manejo MS registrou os maiores valores de A, g_s e E para todas as variedades de soja, sendo que nesse manejo cada variedade recebeu um volume de irrigação distinto para atender a demanda total ao longo do ciclo. Valores similares para esses parâmetros sob condições bem irrigadas foram relatados por Koester (2016) em variedades modernas de soja. Nesse sentido, as reduções de médias encontradas em A, g_s e E em MP poderiam estar associadas a baixa frequência e subestimação da irrigação (Parkash e Singh, 2020; Zhang *et al.*, 2020). Além disso, esse manejo apresentou valores de iEUA superiores em comparação a MS e MC, que, de acordo com Yang *et al.* (2019) sugere que as plantas foram submetidas a certo nível de estresse hídrico.

Para os parâmetros A e E, a semelhança entre MC e MS com diferença significativa na variável g_s , dependendo da variedade, corrobora com os resultados de pesquisas anteriores que indicam que g_s é o parâmetro de troca gasosa mais sensível (Flexas e Medrano, 2022) e tem sido usado para avaliar mudanças fisiológicas entre genótipos (Jiang *et al.*, 2006). Em relação ao potencial hídrico foliar, MS registrou valores mais altos enquanto para os demais manejos os resultados foram menores, variando de acordo com a variedade.

Tabela 10. Valores médios de fotossíntese, condutância estomática, transpiração, eficiência intrínseca do uso da água e potencial hídrico foliar para as três variedades de soja submetidas a diferentes manejos de irrigação

	Fotossíntese ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)				Condutância estomática ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)			
	V1	V2	V3	Média	V1	V2	V3	Média
MS	23.21	21.52	20.46	21.73 a	0.86 Aa	0.63 Ba	0.55 Ba	0.68
MC	19.02	21.08	17.58	19.22 ab	0.51 ABb	0.65Aa	0.38 Bb	0.51
MP	18.40	16.72	17.47	17.53 b	0.51 Ab	0.40 ABb	0.35 Bb	0.42
Média	20.21 A	19.77 A	18.50 A		0.63	0.56	0.43	
M				*				*
V				ns				**
M x V				ns				*
	Transpiração ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)				Eficiência intrínseca do uso da água ($\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$)			
	V1	V2	V3	Média	V1	V2	V3	Média
MS	11.89	10.60	9.76	10.75 a	28.42	38.13	47.29	37.94 b
MC	9.26	10.67	7.13	9.02 ab	51.27	37.86	73.17	54.10 b
MP	8.12	7.43	6.78	7.44 b	63.89	74.92	76.80	71.87 a
Média	9.76 A	9.56 A	7.89 B		47.86 A	50.30 A	65.75 A	
M				**				**
V				*				ns
M x V				ns				ns
Potencial hídrico foliar (-MPa)								
	V1	V2	V3	Média				
MS	2.27 Ab	2.33 Ab	2.10 Ab	2.23				
MC	3.13 Aa	2.00 Bb	2.13 Bb	2.42				
MP	2.00 Bb	2.57 Aa	2.47 Aa	2.35				
Média	2.47	2.30	2.23					
M				ns				
V				ns				
M x V				*				

MS: manejo via solo, baseado do potencial matricial do solo; MC: manejo via clima, baseado na evapotranspiração e no balanço hídrico do solo; MP: manejo via planta, baseado na temperatura do dossel da cultura; V1: variedade TMG 7067; V2: variedade 58i60RSF IPRO; V3: variedade NA 5909; M: manejos de irrigação; V: variedades; *: diferença significativa à 0,05; ** diferença significativa à 0,01; ns: não significativo. Médias seguidas por letras minúsculas distintas dentro de uma coluna e letras maiúsculas distintas dentro de uma linha são diferentes pelo teste LSD à 0,05.

Os valores de referência para o potencial hídrico foliar para o cultivo da soja sob condições bem irrigadas variam de -0,40 a -0,55 MPa de acordo com trabalho realizado por Hossain *et al.* (2014). Para esse mesmo estudo, valores desse parâmetro entre -2,28 a -1,85 MPa foram observados em plantas com restrição hídrica. Avaliando os limites críticos do potencial hídrico foliar para a cultura da soja em diferentes níveis de estresse hídrico, Barbosa (2017) concluiu que valores dessa variável abaixo de -0,90 MPa prejudica o desenvolvimento da cultura. Dessa maneira, apesar da reposição plena em todos os manejos de irrigação, os valores médios do potencial hídrico foliar neste estudo indicam alguma restrição hídrica.

5.4. Efeito dos manejos de irrigação nas respostas morfológicas, de rendimento e produtividade da água

A análise estatística indicou que houve interação entre o manejo de irrigação e a variedade para os parâmetros de altura de plantas (AP), índice de área foliar (IAF) diâmetro do caule (DC) e número de nós por planta (NNP), presente na Tabela 11. Ao considerar as fontes individuais de variação, as interações foram significativas para manejo de irrigação e variedade para todos esses parâmetros, com exceção de manejo para NNP.

Em relação a AP, as menores médias foram apresentadas pelo manejo MP, sendo 27 e 10% inferior a MS e MC, respectivamente, para V2 e V1. Já para V3, esse parâmetro não apresentou variação em relação aos manejos adotados. Avaliando o IAF, as médias para MS foram significativamente superior aos demais manejos, com exceção de V2 para MC. O menor valor registrado para IAF foi para o manejo MC em V1, sendo 54 e 27% inferior a MS e MP. Para DC, em MS e MC as médias foram semelhantes para cada variedade, exceto em V1 que apresentou resultado 21% menor em MC e comparável a DC para MP. Considerando esse manejo, todas as variedades apresentaram média cerca de 19% inferiores a MS. Por fim, para NNP, MS e MC não apresentaram diferença dentro de cada variedade. Para MP, as médias desse quesito foram 12 e 15% inferiores a MS e MC, respectivamente. Isso ressalta que para MP todos os parâmetros morfológicos analisados foram afetados.

Tabela 11. Valores médios de altura de plantas, índice de área foliar, diâmetro do caule e número de nós por planta para as três variedades de soja submetidas a diferentes manejos de irrigação

	Altura de plantas (cm)				Índice de área foliar			
	V1	V2	V3	Média	V1	V2	V3	Média
MS	143.8 Aa	95.9 Ca	110.9 Ba	116.8	7.1 Aa	4.7 Ba	7.1 Aa	6.3
MC	128.1 Aa	88.6 Ca	111.1 Ba	109.3	3.3 Cc	4.1 Ba	5.0 Ab	4.2
MP	105.1 Ab	70.0 Bb	103.6 Aa	92.9	4.5 Ab	2.4 Bb	4.1 Ab	3.7
Média	125.6	84.8	108.5		5.0	3.7	5.4	
M				*				**
V				**				**
M x V				*				**
	Diâmetro do caule (mm)				Número de nós por palnta			
	V1	V2	V3	Média	V1	V2	V3	Média
MS	7.7 Aa	5.6 Ba	5.4 Bab	6.2	22.9 Aa	17.8 Bab	15.5 Ca	18.7
MC	6.1 Ab	5.4 Ba	6.0 Aa	5.8	21.2 Aab	18.7 Ba	16.7 Ca	18.9
MP	5.7 Ab	4.3 Cb	5.1 Bb	5.0	20.1 Ab	15.9 Bb	15.6 Ba	17.2
Média	6.5	5.1	5.5		21.4	17.4	15.9	
M				**				ns
V				**				**
M x V				**				*

MS: manejo via solo, baseado do potencial matricial do solo; MC: manejo via clima, baseado na evapotranspiração e no balanço hídrico do solo; MP: manejo via planta, baseado na temperatura do dossel da cultura; V1: variedade TMG 7067; V2: variedade 58i60RSF IPRO; V3: variedade NA 5909; M: manejos de irrigação; V: variedades; *: diferença significativa à 0,05; ** diferença significativa à 0,01; ns: não significativo. Médias seguidas por letras minúsculas distintas dentro de uma coluna e letras maiúsculas distintas dentro de uma linha são diferentes pelo teste LSD à 0,05.

A diferença entre temperatura do dossel da cultura e temperatura do ar tem sido utilizada como um indicador para programação da irrigação, mas não para cálculo de volume de irrigação (Irmak et al., 2000; Khorsand et al., 2019). Este, pode ser calculado de acordo com os outros dois manejos utilizados (Veysi et al., 2017; Osroosh et al., 2015). Como a irrigação para MP foi baseada em MC, a quantidade de água para o bom desenvolvimento da cultura foi subestimada, de acordo com explicação mencionada anteriormente com relação aos valores de Kc adotados, o que acarretou efeitos negativos nas plantas de soja. Além disso, Idso et al. (1980) demonstraram através das culturas do trigo, cevada e sorgo que valores positivos de ΔT estão associados à irrigação deficitária. Portanto, o limite escolhido para irrigação pode ter ocasionado certo nível de estresse hídrico nas plantas.

Avaliando os parâmetros ligados a rendimento, o manejo de irrigação foi significativo para rendimento de grãos (RG), massa seca vegetal (MSV) e vagens por planta (PP), já variedade foi significativa para todos esses quesitos e para a massa de 100 grãos (P100). A interação entre manejo de irrigação e variedade foi significativa para RG, MSV e PP. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 12.

Tabela 12. Valores médios de rendimento de grãos, massa seca vegetal, número de vagens por planta e peso de 100 grãos para as três variedades de soja submetidas a diferentes manejos de irrigação

	Rendimento de grãos (Mg ha ⁻¹)				Massa seca vegetal (Mg ha ⁻¹)			
	V1	V2	V3	Média	V1	V2	V3	Média
MS	2.9 Ba	4.2 Aa	3.4 Ba	3.5	12.8 Aa	11.5 Aa	12.1 Aa	12.1
MC	1.5 Cb	3.4 Ab	2.6 Bb	2.5	8.4 Bb	10.1 Ab	11.2 Aab	9.9
MP	1.8 Bb	2.3 ABc	2.6 Ab	2.2	8.8 Ab	7.4 Bc	10.1 Ab	8.8
Média	2.1	3.3	2.9		10.0	9.7	11.1	
M				**				**
V				**				**
M x V				*				**
	Número de vagens por planta				Massa de 100 grãos (g)			
	V1	V2	V3	Média	V1	V2	V3	Média
MS	65.8 Aa	49.3 Ba	41.5 Ba	52.2	9.6	13.0	11.1	11.3 a
MC	35.8 ABb	43.8 Aa	29.9 Bb	36.5	11.1	14.1	10.8	11.9 a
MP	43.3 Ab	29.6 Bb	27.8 Bb	33.6	10.2	13.1	11.6	11.6 a
Média	48.3	40.9	33.1		10.3 B	13.4 A	11.2 B	
M				**				ns
V				**				**
M x V				*				ns

MS: manejo via solo, baseado do potencial matricial do solo; MC: manejo via clima, baseado na evapotranspiração e no balanço hídrico do solo; MP: manejo via planta, baseado na temperatura do dossel da cultura; V1: variedade TMG 7067; V2: variedade 58i60RSF IPRO; V3: variedade NA 5909; M: manejos de irrigação; V: variedades; *: diferença significativa à 0,05; ** diferença significativa à 0,01; ns: não significativo. Médias seguidas por letras minúsculas distintas dentro de uma coluna e letras maiúsculas distintas dentro de uma linha são diferentes pelo teste LSD à 0,05.

Avaliando o rendimento de grãos, o manejo MS apresentou médias superiores significativamente para todas as variedades em 26 e 37% para MC e MP, respectivamente. Esses últimos apresentaram valores similares para V1 e V3. Seguindo tendência semelhante ao rendimento de grãos, para os valores de biomassa os manejos MC e MP apresentaram médias 19 e 27% significativamente inferiores a MS, respectivamente. Na sequência, para o parâmetro

NVP o manejo MS foi significativamente maior para todas as variedades com exceção de V1 para MC. Considerando V1 e V3, MC e MP alcançaram médias semelhantes. Por fim, para P100 não houve diferença significativa para manejos de irrigação, entretanto, entre as variedades ocorreu diferença entre as médias.

Os resultados indicam que sob o manejo de irrigação baseado no solo, a produtividade e componentes de produtividade apresentaram melhor desempenho. Pesquisas anteriores sugerem que a adoção MS com reposição completa da lâmina implica em resultados ótimos de produtividade para culturas como o arroz e a cana-de-açúcar (Kumar et al.; 2017; Quiloango-Chimarro et al., 2022).

O valor de rendimentos de grãos para MC foi reduzido, apesar da semelhança entre grande parte das respostas fisiológicas entre esse manejo e MS. Uma possibilidade é de que as médias reduzidas ligeiramente não significativas ao longo do ciclo da cultura ocasionaram baixos valores de IAF, influenciando diretamente na produção (Vijayaraghavareddy et al., 2020).

Para o manejo MP os resultados foram ainda mais prejudicados em relação a MS, com impactos principalmente em AP, IAF, DC e NNP para as três variedades, com destaque para V2. Uma menor disponibilidade de água influencia em características fisiológicas e morfológicas das culturas, como no crescimento das raízes, que estão diretamente ligadas a absorção de nutrientes e, portanto, no rendimento. A subestimação da irrigação para esse manejo pode ter prejudicado o desenvolvimento radicular das plantas, trazendo resultados negativos de rendimento (Mark et al., 2014).

Para a produtividade da água, a interação entre manejo de irrigação e variedade foi significativa (Figura 13). Nesse parâmetro o manejo MP obteve médias significativamente maiores do que MS em V1 e V3. Quando comparado a MC, MP foi significativamente maior apenas em V1. A variedade V2 não apresentou diferença significativa em todos os manejos de irrigação e obteve os maiores valores de produtividade da água entre as demais variedades, com média de $0,84 \text{ kg m}^{-3}$. Para V1 e V3, MS e MC apresentaram valores similares para esse quesito dentro de cada variedade.

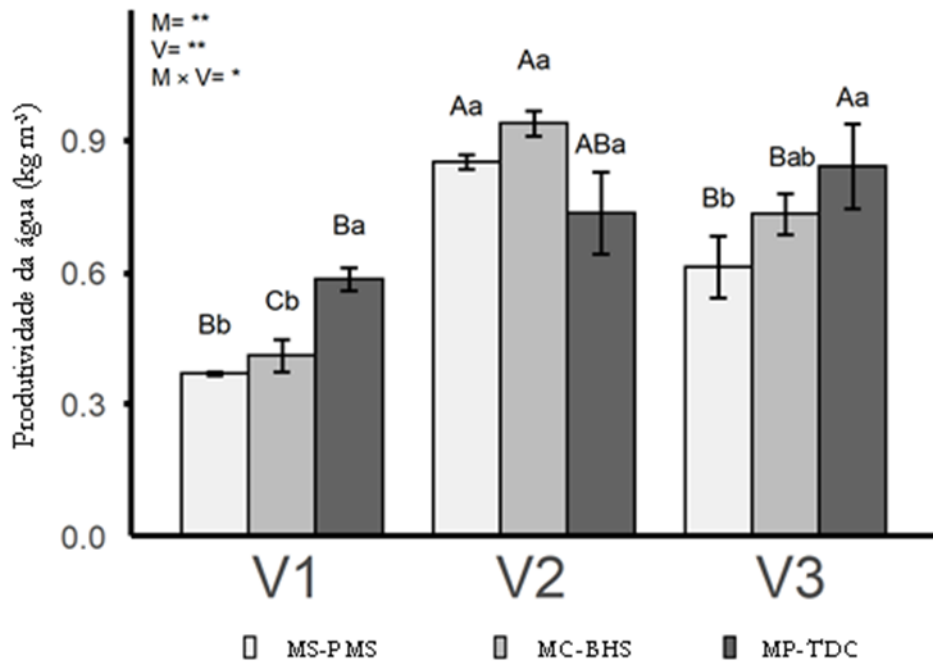


Figura 14. Valores médios de produtividade da água em kg m^{-3} para as três variedades de soja submetidas a diferentes manejos de irrigação. MS: manejo via solo, baseado do potencial matricial do solo; MC: manejo via clima, baseado na evapotranspiração e no balanço hídrico do solo; MP: manejo via planta, baseado na temperatura do dossel da cultura; V1: variedade TMG 7067; V2: variedade 58i60RSF IPRO; V3: variedade NA 5909; M: manejos de irrigação; V: variedades; *: diferença significativa à 0,05; ** diferença significativa à 0,01. As letras minúsculas distintas entre variedades e as letras maiúsculas distintas entre os manejos de irrigação são diferentes pelo teste LSD à 0,05.

Os resultados mais altos para a produtividade da água registrados para MP podem estar relacionados com o menor volume de água aplicado nesse manejo de irrigação, o que é corroborado pela pesquisa realizada por Candogan *et al.* (2013) com a cultura da soja. Outro ponto é que, de acordo com Hou *et al.* (2019), estratégias para aplicação de água com limite para irrigação semelhantes ao adotado no presente estudo maximizam a produtividade da água ao invés de componentes de rendimento. Dessa maneira, MP se mostra como opção viável para programação da irrigação, mas pesquisas devem ser realizadas acerca da quantidade de água a ser aplicada e do limite para irrigação para a cultura da soja em condições tropicais.

A variedade V2, com o maior potencial de rendimento, manteve a produtividade da água para todos os manejos de irrigação e mais pesquisas poderiam ser conduzidas para avaliar esse comportamento. Garcia *et al.* (2010) avaliando o comportamento de quatro genótipos de soja sob três regimes de irrigação encontraram variação de respostas em função de diferenças genótípicas para a eficiência do uso da água. Almeida (2021) em estudo avaliando esse

parâmetro e a resposta termal da cultura da soja sob diferentes níveis de reposição hídrica, concluiu que à medida que a reposição hídrica do solo diminuiu ocorreu maior valor da eficiência do uso da água.

Ainda tratando da produtividade da água, pesquisas anteriores como a de Gajic *et al.* (2018) sugerem que para MS em capacidade de campo, esse parâmetro apresenta valores menores para a cultura da soja, uma vez que o foco se torna o potencial de produção de grãos. Por fim, apesar de MS e MC apresentarem valores semelhantes de produtividade da água, as diferenças no rendimento de grãos foram significativas, reiterando que os valores de Kc e ET devem ser ajustados (calibrados) para evitar frequência e quantidade de irrigação inadequadas (Silva *et al.*, 2019; Costa *et al.*, 2020a).

5.5. Análise de componentes principais para os parâmetros avaliados

A Figura 14 apresenta a análise de componentes principais para os parâmetros mais relevantes avaliados. Os dois primeiros componentes principais explicaram 79% da variação total, sendo o primeiro 55,1% e o segundo 23,9%.

V1 - MS se apresentou no lado positivo do primeiro componente principal e correlacionada aos parâmetros DC, NNP, AP, NVP, BA, A, E e gs. Do lado negativo se apresentaram V1- MP, V2 - MP, V3 - MP e V3 - MC, correlacionados com iEUA. V2 - MS, V3 - MS e V3 - MC foram agrupados no lado positivo do segundo componente principal e correlacionados com rendimento de grãos, potencial hídrico foliar, produtividade da água e peso de 100 grãos. V1 - MC se apresentou do lado negativo.

O potencial hídrico foliar foi altamente correlacionado com rendimento de grãos, indo de acordo com o estudo de Gupta *et al.* (2001) com trigo, indicando uma tendência de efeitos adversos de valores mais elevados do potencial hídrico foliar sobre o rendimento de grãos.

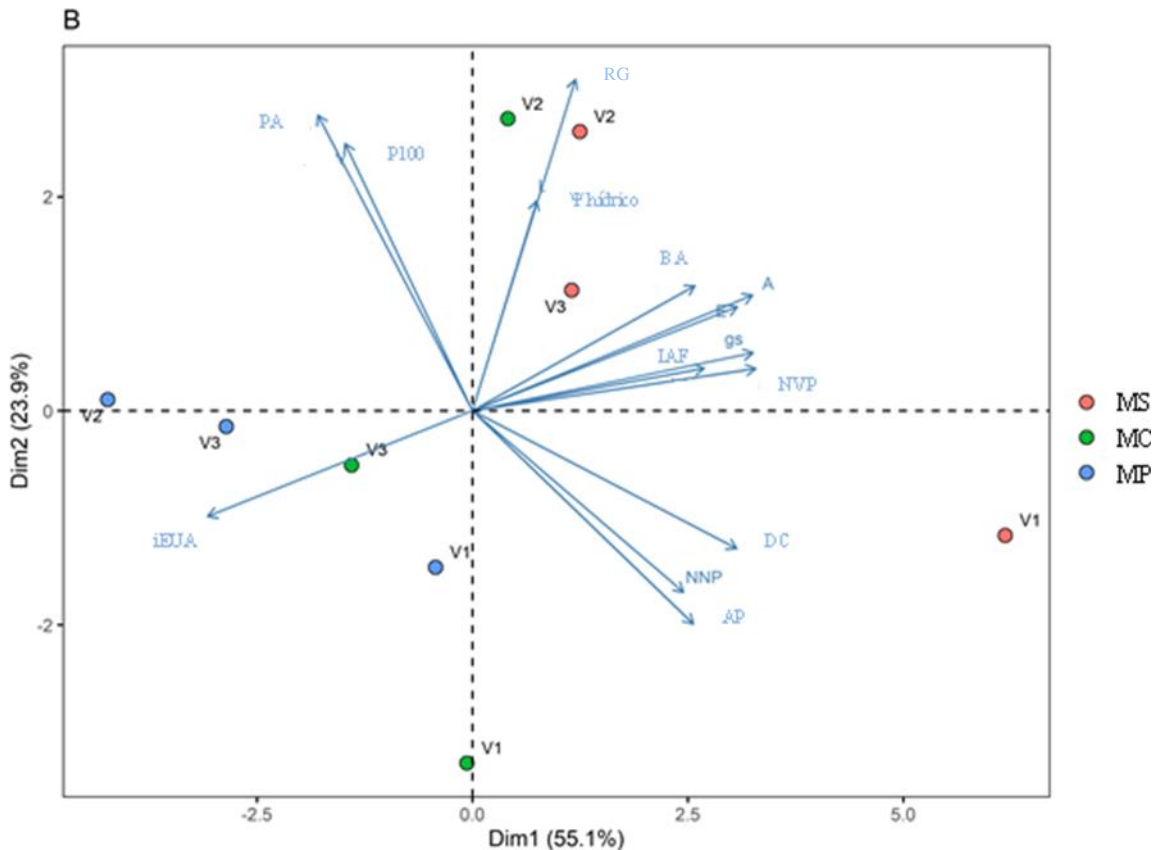


Figura 15. Análise de componentes principais para os parâmetros mais relevantes avaliados. MS: manejo via solo, baseado do potencial matricial do solo; MC: manejo via clima, baseado na evapotranspiração e no balanço hídrico do solo; MP: manejo via planta, baseado na temperatura do dossel da cultura; V1: variedade TMG 7067; V2: variedade 58i60RSF IPRO; V3: variedade NA 5909; iEUA: eficiência intrínseca do uso da água; PA: produtividade da água; P100: peso de 100 grãos; RG: rendimento de grãos; Ψ hídrico: potencial hídrico foliar; BA: biomassa acima do solo (equivalente a MSV); A: fotossíntese; E: transpiração; gs: condutância estomática; IAF: índice de área foliar; DC: diâmetro do caule; AP: altura de plantas; NNP: número de nós por planta.

A variedade V1 para todos os manejos de irrigação foi associada com altura de plantas e diâmetro do caule mais altos, porém, com rendimento de grãos mais baixos, o que pode ser considerado por agricultores no momento da escolha de variedades a serem plantadas. Os menores valores do rendimento de grãos estão associados a uma redução do número de nós por planta, corroborando com os estudos de Bárbaro et al. (2006). Mathobo et al. (2017) em pesquisa demonstraram que um aumento no estresse hídrico, ainda que pequeno, está relacionado ao abortamento de flores e consequentemente, com a redução do número de nós por planta para as leguminosas de grãos. Dessa forma, a adoção de frequência e volume corretos na fase reprodutiva se tornam importantes.

6. CONCLUSÃO

Os resultados desse estudo, indicam que os diferentes manejos de irrigação adotados na cultura da soja, com base nas metodologias de solo, clima e planta, influenciaram significativamente os aspectos fisiológicos, de rendimento e da produtividade da água para as três variedades analisadas.

As variedades testadas apresentaram respostas distintas quando submetidas aos manejos de irrigação impostos, em termos de consumo de água e do número de irrigação efetivadas. Em média o consumo hídrico para as três variedades sob o manejo via solo, MS, foi 42 e 49% superior do que via clima e via planta, MC e MP, respectivamente.

Em relação aos parâmetros fisiológicos, houve um aumento da taxa fotossintética líquida, transpiração, condutância estomática e potencial hídrico foliar à medida que o volume de água aplicado foi maior; entretanto, para os dois últimos quesitos ocorreu variação dentro de cada variedade analisada.

Quanto ao rendimento de grãos, o método de solo via tensiometria MS apresentou resultado significativamente maior ($3,5 \text{ Mg ha}^{-1}$) do que o método climatológico MC ($2,5 \text{ Mg ha}^{-1}$) e o método de planta MP ($2,2 \text{ Mg ha}^{-1}$). Os componentes de rendimento seguiram padrão semelhante. Para a produtividade da água, MP registrou aumentos significativos para todas as variedades de soja, exceto V2, que registrou os maiores valores para esse parâmetro em todos os manejos de irrigação, com média de $0,84 \text{ kg m}^{-3}$. Portanto, de forma geral a produtividade da água foi antagônica a produtividade por unidade de área na cultura da soja.

Por fim, o manejo de irrigação via climatológica, com base na metodologia de balanço hídrico e nos dados de Kc da FAO adotados, subestimou a necessidade hídrica da soja irrigada para as três variedades estudadas, resultando numa menor produtividade por área quando comparado ao manejo de irrigação via solo (tensiômetro). É recomendada a calibração varietal dos valores de Kc ao longo do ciclo de cultivo irrigado, para assegurar que a produtividade da água e a produtividade da cultura, sejam otimizadas para as condições atmosféricas disponíveis e de manejo adotadas na área irrigada.

REFERÊNCIAS

- ALDERFASI, A. A.; NIELSEN, D. C. 2001. Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat. **Agricultural Water Management**, v. 47, n. 1, p. 69-75.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. 1998. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements. **FAO Irrig. Drain**. Pap. 56.
- ALLIPRANDINI, L. F.; ABATTI, C.; BERTAGNOLLI, P. F.; CAVASSIM, J. E.; GABE, H. L.; KUREK, A.; MATSUMOTO, M. N.; OLIVEIRA, M. A. R.; PITOL, C; PRADO, L. C.; STECKLING, C. 2009. Understanding soybean maturity groups in Brazil: environment, cultivar classification, and stability. **Crop Science**, v. 49, n. 3, p. 801-808.
- ALMEIDA, A. M. D. 2021. **Eficiência do uso da água e resposta termal da cultura da soja submetida a diferentes níveis de reposição hídrica**. Tese (Doutorado). Orientador: Rubens Duarte Coelho. Curso de Engenharia de Sistemas Agrícolas, Universidade de São Paulo, 75 p.
- ALVES, S. B. 1998. Controle microbiano de insetos. FEALQ, p. 11633.
- ANA. Agência Nacional de Águas. 2021. **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Brasília, 66 p.
- ANAPALLI, S.S.; PINNAMANENI, S.R.; REDDY, K.N.; SUI, R.; SINGH, G. 2022. Investigating soybean (*Glycine max* L.) responses to irrigation on a large-scale farm in the humid climate of the Mississippi Delta region. **Agricultural Water Management**, v. 262, p. 107432.
- ANDRADE, I. P. D. S. 2012. **Manejo da irrigação na cultura da figueira (*Ficus carica* L.) utilizando o balanço de água no solo**. Dissertação (Mestrado). Orientador: Daniel Fonseca de Carvalho. Curso de Ciência do Solo, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 56 p.
- APROSOJA. Associação dos produtores de soja e milho do Mato Grosso. 2022. **A história da soja**. Disponível em < <http://www.aprosoja.com.br/soja-e-milho/a-historia-da-soja#:~:text=No%20Brasil,de%20sementes%20para%20produtores%20paulistas>. >. Acesso em maio 2022.

- BÁRBARO, I.M.; CENTURION, M.A.P.D.C.; DI MAURO, A.O.; UNÊDA-TREVISOLI, S.H.; ARRIEL, N.H.C.; COSTA, M.M. 2006. Path analysis and expected response in indirect selection for grain yield in soybean. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, p. 151–159.
- BARBOSA, L. A. 2017. **Limite crítico do potencial hídrico da soja durante os estádios vegetativo e reprodutivo**. Dissertação (mestrado). 91f. Universidade Federal de Uberlândia.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P.C.; PARKER, P.S.; NENDEL, C.; GIL, M.D.S.; FARIAS, J.R.B.; BASSO, C.J., 2018. Assessment of crop-management strategies to improve soybean resilience to climate change in Southern Brazil. **Crop and Pasture Science**, v. 69, p. 154–162.
- BELLALOU, N.; MENGISTU, A.; SMITH, J.R.; ABBAS, H.K.; ACCINELLI, C.; SHIER, W.T. 2021. Effects of charcoal rot on soybean seed composition in soybean genotypes that differ in charcoal rot resistance under irrigated and non-irrigated conditions. **Plants**, v. 10, p. 1801.
- BERNARDO, S; MANTOVANI, E.; SOARES, E. AA. 2019. **Manual de irrigação**.
- BHATTI, S.; HEEREN, D.M.; EVETT, S.R.; O'SHAUGHNESSY, S.A.; RUDNICK, D.R.; FRANZ, T.E.; GE, Y.; NEALE, C.M.U. 2022. Crop response to thermal stress without yield loss in irrigated maize and soybean in Nebraska. **Agricultural Water Management**, v. 274, p. 107946.
- BLUM, A. 2009. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. **Field Crops Research**, v. 112, p. 119–123.
- BONATO, E. R. 2000. Estresses em soja. **Embrapa Trigo**, 254 p.
- BRASIL. 1997. **Política Nacional de Recursos Hídricos**.
- BRITO, R. 2007. Disponibilidade e produtividade da água: um desafio para o século 21. In Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: SIMPÓSIO DE PESQUISA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS NO SEMI-ÁRIDO MINEIRO, 1., 2007, Janaúba. **Desenvolvimento sustentável regional: anais**. Janaúba: UNIMONTES: UFMG: UFVJM, 2007.
- BUTTARO, D.; SANTAMARIA, P.; SIGNORE, A.; CANTORE, V.; BOARI, F.; MONTESANO, F.F.; PARENTE, A. 2015. Irrigation management of greenhouse tomato and

cucumber using tensiometer: effects on yield, quality and water use. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 4, p. 440–444.

BUTTARO, D.; SANTAMARIA, P.; Signore, A.; CANTORE, V.; BOARI, F.; MONTESANO, F.F.; PARENTE, A. 2015. Irrigation management of greenhouse tomato and cucumber using tensiometer: effects on yield, quality and water use. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 4, p. 440–444.

BWAMBALE, E.; ABAGALE, F.K.; ANORNU, G.K. 2022. Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. **Agricultural Water Management**, v. 260, p. 107324.

CABRAL, L. C.; MODESTA, R. C. D. 1981. A soja na alimentação humana. **Centro de Tecnologia Agrícola e Alimentar**, Embrapa, p. 59.

CAMELLO, Q. A. C.; OLIVEIRA, F. A. 2006. Nutrição de lavouras de soja: situação atual e perspectivas. **Visão Agrícola**, n. 5, p. 4.

CAMPBELL, G. S.; MULLA, D. J. 1990. Measurement of soil water content and potential, BA Stewart and DR Nielsen (eds.), **Irrigation of Agricultural Crops**, p. 127–142.

CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. 1998. The light environment of plant canopies. In An introduction to environmental biophysics (pp. 247-278). **Springer**, New York, NY.

CANDOGAN, B.N.; SINCIK, M.; BUYUKCANGAZ, H.; DEMIRTAS, C.; GOKSOY, A.T.; YAZGAN, S. 2013. Yield, quality and crop water stress index relationships for deficit-irrigated soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] in sub-humid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, v. 118, p. 113–121.

CANNAVO, P.; ALI, H.B.; CHANTOISEAU, E.; MIGEON, C.; CHARPENTIER, S.; BOURNET, P.-E. 2016. Stomatal resistance of New Guinea Impatiens pot plants. Part 2: Model extension for water restriction and application to irrigation scheduling. **Biosystems Engineering**, v. 149, p. 82–93.

CARVALHO, D. F.; OLIVEIRA, L. F. C. 2012. **Planejamento e manejo da água na agricultura irrigada**. Viçosa, MG: UFV, 239 p.

CHECHI, A.; ROEHRIG, R.; PITON, B.; DA LUZ, M.R.; DEUNER, C.C.; FORCELINI, C.A.; BOLLER, W. 2020. The combined use of spray volumes and droplet sizes in the chemical

control of Asian soybean rust in cultivars with different leaf area indices. **Crop Protection**, v. 136, p. 105212.

CNA. Confederação Nacional da Agricultura e Pecuária do Brasil. 2022. **Panorama do agro**. Disponível em < <https://cnabrasil.org.br/cna/panorama-do-agro> >. Acesso em fev 2022.

COELHO, E. F.; OLIVEIRA, A. M. G.; SILVA, J. G. F.; COELHO FILHO, M. A.; CRUZ, JAILSON, L. C. 2011. Irrigação e fertirrigação na cultura do mamão. In: SOUSA, V. F.; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. (Ed.). **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, p.441-472.

COELHO, R. D. 2022. A revolução azul no contexto da agricultura irrigada. **Agricultura irrigada no Brasil: ciência e tecnologia**, p. 397-il.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. 2022. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. V. 1, n. 1, p. 86. Brasília.

CONEJERO, W.; ALARCÓN, J.J.; GARCÍA-ORELLANA, Y.; NICOLÁS, E.; TORRECILLAS, A. 2007. Evaluation of sap flow and trunk diameter sensors for irrigation scheduling in early maturing peach trees. **Tree Physiology**, v. 27, p. 1753–1759.

COSTA, J.O.; COELHO, R.D.; DA SILVA BARROS, T.H.; JÚNIOR, E.F.F.; FERNANDES, A.L.T. 2020a. Tensiometry applied in the estimation of the water consumption of the coffee tree irrigated by drip irrigation. **Revista Geama**, v. 6, p. 17–24.

COSTA, J. O.; COELHO, R.D.; BARROS, T.H.D.S.; FRAGA JÚNIOR, E.F.; FERNANDES, A.L.T., 2020b. Canopy thermal response to water deficit of coffee plants under drip irrigation. **Irrigation and Drainage**, v. 69, p. 472–482.

COTRIM, M. F.; GAVA, R.; CAMPOS, C. N. S.; de DAVID, C. H. O.; REIS, I. D. A.; TEODORO, L. P. R.; TEODORO, P. E. 2021. **Physiological performance of soybean genotypes grown under irrigated and rainfed conditions**. Journal of Agronomy and Crop Science, v. 207, n. 1, p. 34-43.

ÇOLAK, Y.B.; YAZAR, A.; ÇOLAK, İ.; AKÇA, H.; DURAKTEKIN, G. 2015. Evaluation of Crop Water Stress Index (CWSI) for eggplant under varying irrigation regimes using surface and subsurface drip systems. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 4, p. 372–382.

da CUNHA, G. R.; SANTI, A.; PASINATO, A.; DALMAGO, G., PIRES, J.; de GOUVEA, J. A. 2014. **Gestão da produtividade da água em agricultura: o desafio de elevar o rendimento dos cultivos em ambientes com restrição hídrica.**

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

de ALMEIDA, A.M.; COELHO, R.D.; BARROS, T.H.S.; COSTA, J.O.; QUILOANGO-CHIMARRO, C.A.; MORENO-PIZANI, M.A.; FARIAS-RAMÍREZ, A.J., 2022. Water productivity and canopy thermal response of pearl millet subjected to different irrigation levels. **Agricultural Water Management**, v. 272, p. 107829.

de CAMARGO, M. B. P. 1982. Tensiômetro simples de leitura direta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 17, n. 12, p. 1763-1772.

DEJONGE, K. C.; TAGHVAEIAN, S.; TROUT, T. J.; COMAS, L. H. 2015. Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. **Agricultural Water Management**, v. 156, p. 51-62.

de OLIVEIRA COSTA, J.; JOSÉ, J.V.; WOLFF, W.; de OLIVEIRA, N.P.R.; OLIVEIRA, R.C.; RIBEIRO, N.L.; COELHO, R.D., DA SILVA, T.J.A.; BONFIM-SILVA, E.M.; SCHLICHTING, A.F. 2020. Spatial variability quantification of maize water consumption based on Google EEflux tool. **Agricultural Water Management**, v. 232, p. 106037.

DU, T.; KANG, S.; ZHANG, J.; DAVIES, W. 2015. Deficit irrigation and sustainable waterresource strategies in agriculture for China's food security. **Journal of Experimental Botany**, v. 4, p. 1-17.

DURLI, M.M.; SANGOI, L.; SOUZA, C.A.; OLIVEIRA, V. de L.; MARTINS JUNIOR, M.C.; KUNESKI, H.F.; LEOLATO, L.S. 2022. Soybean tolerance to defoliation at the beginning of pod formation as affected by plant density. **Revista Ceres**, v. 69, p. 408–415.

DZIKOWSKI, B. 1936. Study of the soya bean *Glycine hispida* (Moench) Maxim. Part Morphol. **Pamiętnik Państwowego Inst. Nauk. Gospod. Wiej. W Pulawach**, v. 16, p. 69-100.

EATON, F. M.; BELDEN, G. O. 1929. **Leaf temperatures of cotton and their relation to transpiration, varietal differences and yields.** (No14882016124121).

- EHLERS, J. H. 1915. The temperature of leaves of Pinus in winter. **American Journal of Botany**, v. 2, p. 32-70.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2001. Tecnologias de produção de soja-Região Central do Brasil-2001/2002. Embrapa Soja-Documents (INFOTECA-E).
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2008. Tecnologias de produção de soja – região central do Brasil 2009 e 2010. **Embrapa Soja**, Londrina, 262 p.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2022. A importância econômica da soja. **Arvore do Conhecimento: Soja**. Disponível em <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/soja/arvore/CONTAG01_12_271020069131.html>. Acesso em mar 2022.
- EWAID, S.H.; ABED, S.A.; AL-ANSARI, N. 2019. Crop water requirements and irrigation schedules for some major crops in Southern Iraq. **Water**, v. 11, n. 4, p. 756.
- FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. 2007. Ecofisiologia da Soja. **Circular Técnica, Embrapa Soja** (INFOTECA-E), p. 9.
- FATTAHI, K.; BABAZADEH, H.; NAJAFI, P.; SEDGHI, H. 2018. Scheduling maize irrigation based on crop water stress index (CWSI). **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 16, n. 6, p. 7535-7549.
- FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. 1977. Stages of soybean development. Ames: Iowa State University of Science and Technology, p. 11.
- FLEXAS, J.; MEDRANO, H. 2002. Drought-inhibition of photosynthesis in C3 plants: stomatal and non-stomatal limitations revisited. **Annals of Botany**, v. 89, p. 183–189.
- FLORA E FUNGA DO BRASIL. 2022. **Fabaceae in Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB615834>>.
- FORMENTINI, A. C. 2009. Lepidópteros associados à cultura da soja: diversidade e parasitismo natural por insetos e fungos entomopatogênicos. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, RS.
- FRANÇOIS, T. 2012. **Relações hídricas e trocas gasosas em plantas de feijão submetidas em irrigação deficitária**. Orientador: Reimar Carlesso. 113 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS.

FRIED, H. G.; NARAYANAN, S.; FALLEN, B. 2019. Evaluation of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] genotypes for yield, water use efficiency, and root traits. **PloS one**, v. 14, n. 2, e0212700.

FRIZZONE, J.A. 2007. Planning irrigation with use of optimization techniques. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 1, n. 1, p. 3-11.

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

GARCIA, A.; ANDRE, R. G. B.; FERREIRA, M. I.; PAÇO, T. D. 2000. Comparação de modelos para avaliação do estresse hídrico em cultura de nectarinas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, n. 1, p. 43-48.

GARCIA, A.; PÍPOLO, A. E.; LOPES, I.; PORTUGAL, F. A. 2007. Instalação da lavoura de soja: época, cultivares, espaçamento e população de plantas. **Embrapa Soja-Circular Técnica (INFOTECA-E)**.

GAVA, R.; FRIZZONE, J. A.; SNYDER, R. L.; ALMEIDA, B. M.; FREITAS, P. S.; REZENDE, R. 2016. Estratégias de manejo de déficit hídrico na irrigação da cultura da soja/Strategies of deficit water management in irrigation of soybean crop. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 10, n. 3, p. 305-315.

GONTIA, N. K.; TIWARI, K. N. 2008. Development of crop water stress index of wheat crop for scheduling irrigation using infrared thermometry. **Agricultural Water Management**, v. 95, n. 10, p. 1144-1152.

GORNALL, J.; BETTS, R.; BURKE, E.; CLARK, R.; CAMP, J.; WILLET, K.; WILTSHIRE, A. 2010. Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, v. 365, p. 2973-2989.

GUIMARAES, D. P.; LANDAU, E. C. 2020. Georreferenciamento dos pivôs centrais de irrigação no Brasil: ano base 2020. **Embrapa Milho e Sorgo-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**.

GUIMARÃES, F.V. 2005. **Respostas fisiológicas e bioquímicas em plantas de feijão de corda cv Pitiúba submetidas ao estresse com NaCl em diferentes concentrações de CaCl₂ e CaSO₄**. 176f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza..

GUPTA, N.K.; GUPTA, S.; KUMAR, A. 2001. Effect of water stress on physiological attributes and their relationship with growth and yield of wheat cultivars at different stages. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 186, n. 1, p. 55–62.

HEERMANN, D. F.; MARTIN, D. L.; JACKSON, R. D.; STEGMAN, E. C. 1990. Irrigation scheduling controls and techniques. In: STEWART, B. A.; IELSEN, D. R. **Irrigation of agricultural crops**. Madison: ASAE, p. 509-535. (Agronomy Series, 30).

HILLEL, D. 2003. Introduction to environmental soil physics. **Elsevier**. 493 p.

HOU, M.; TIAN, F.; ZHANG, T.; HUANG, M. 2019. Evaluation of canopy temperature depression, transpiration, and canopy greenness in relation to yield of soybean at reproductive stage based on remote sensing imagery. **Agricultural Water Management**, v. 222, p. 182–192.

HOSSAIN, M. M.; LIU, X.; QI, X.; LAM, H. M.; ZHANG, J. 2014. Differences between soybean genotypes in physiological response to sequential soil drying and rewetting. **The Crop Journal**, v. 2, n. 6, p. 366-380.

IDSO, S. B.; REGINATO, R. J.; HATFIELD, J. L.; WALKER, G. K.; JACKSON, R. D.; PINTER, P. J. 1980. A generalization of the stress-degree-day concept of yield prediction to accommodate a diversity of crops. **Agricultural Meteorology**, v. 21, n. 3, p. 205-211.

IMEA. 2020. Custo de produção da soja safra 2020/21. Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária. Disponível em https://bucket-xiruxerno-2.s3.sa-east-1.amazonaws.com/4/696277432068079616/1020196955711545344-Custo%20de%20Produ%C3%A7%C3%A3o%20-%20Soja.pdf?X-Amz-Expires=432000&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIOZVUSV4HGV74RLA/20200807/sa-east-1/s3/aws4_request&X-Amz-Date=20200807T180622Z&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=7a61c987f15670f122d4e3d4d6684bcd2064edf2bd0232bffa70723bfe44b158.

Acesso em 31 de julho de 2020.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. 2005. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2-3, p. 185-202.

IRMAK, S.; HAMAN, D.Z.; BASTUG, R. 2000. Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. **Agronomy Journal**, v. 92, p. 1221.

JACKSON, R. D.; IDSO, S. B.; REGINATO, R. J.; PINTER, P. J. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water resources research*, v. 17, n. 4, p. 1133-1138.

JALEEL, C. A.; MANIVANNAN, P. A. R. A. M. A. S. I. V. A. M.; WAHID, A.; FAROOQ, M.; AL-JUBURI, H. J.; SOMASUNDARAM, R. A. M. A. M. U. R. T. H. Y.; PANNEERSELVAM, R. 2009. Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. **International Journal of Agriculture And Biology**, v. 11, n. 1, p. 100-105.

JAMALI, S.; ANSARI, H. 2022. Scheduling Quinoa Irrigation by Crop Water Stress Index. **Iranian Journal of Irrigation & Drainage**, v. 15, n. 6, p. 1263-1274.

JAMES, L. G. 1988. Principles of farm irrigation systems design. **John Wiley and Sons Limited**.

JIANG, Q.; ROCHE, D.; MONACO, T.A.; HOLE, D. 2006. Stomatal conductance is a key parameter to assess limitations to photosynthesis and growth potential in barley genotypes. **Plant Biology**, v. 8, p. 515–521.

KANG, S.; HAO, X.; DU, T.; TONG, L.; SU, X.; LU, H.; LI, X.; HUO, Z.; LI, S.; DING, R. 2017. Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under changing environment: From research to practice. **Agricultural Water Management**, v. 179, p. 5–17.

KANG, J.; HAO, X.; ZHOU, H.; DING, R. 2021. An integrated strategy for improving water use efficiency by understanding physiological mechanisms of crops responding to water deficit: Present and prospect. **Agricultural Water Management**, v. 255, p. 107008.

KHORSAND, A.; REZAVERDINEJAD, V.; ASGARZADEH, H.; MAJNOONI-HERIS, A.; RAHIMI, A.; BESHARAT, S. 2019. Irrigation scheduling of maize based on plant and soil indices with surface drip irrigation subjected to different irrigation regimes. **Agricultural Water Management**, v. 224, p. 105740.

KHORSAND, A.; REZAVERDINEJAD, V.; ASGARZADEH, H.; MAJNOONI-HERIS, A.; RAHIMI, A.; BESHARAT, S.; SADRADDINI, A.A. 2021. Linking plant and soil indices for water stress management in black gram. **Scientific Reports**, v. 11, p. 1–19.

- KHORSANDI, A.; HEMMAT, A.; MIREEI, S.A.; AMIRFATTAHI, R.; EHSANZADEH, P. 2018. Plant temperature-based indices using infrared thermography for detecting water status in sesame under greenhouse conditions. **Agricultural Water Management**, v. 204, p. 222–233.
- KIRKHAN, M.B. Principles of soil and water plant relations. **Elsevier Academic Press**, 2004. 500 p.
- KIRNAK, H.; IRIK, H.A.; UNLUKARA, A. 2019. Potential use of crop water stress index (CWSI) in irrigation scheduling of drip-irrigated seed pumpkin plants with different irrigation levels. **Scientia Horticulturae**, v. 256, p. 108608.
- KOESTER, R.P.; NOHL, B.M.; DIERS, B.W.; AINSWORTH, E.A. 2016. Has photosynthetic capacity increased with 80 years of soybean breeding? An examination of historical soybean cultivars. **Plant, Cell & Environment**, v. 39, p. 1058–1067.
- KUMAR, A.; NAYAK, A.K.; PANI, D.R.; DAS, B.S. 2017. Physiological and morphological responses of four different rice cultivars to soil water potential based deficit irrigation management strategies. **Field Crops Research**, v. 205, p. 78–94.
- KUMAR JHA, S.; RAMATSHABA, T.S.; WANG, G.; LIANG, Y.; LIU, H.; GAO, Y.; DUAN, A. 2019. Response of growth, yield and water use efficiency of winter wheat to different irrigation methods and scheduling in North China Plain. **Agricultural Water Management**, v. 217, p. 292–302.
- KUSS, R. C. R. 2006. **Populações de plantas e estratégias de irrigação na cultura da soja**. Orientador: Osvaldo König. Dissertação (Mestrado). Curso de Engenharia Agrícola. 81f.– Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- LIBARDI, P.L. 2005. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 329 p.
- LIMA, F.B.; SANTOS, G.O. 2009. **Balço hídrico-espacial da cultura para o uso e ocupação atual da bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Rita, Noroeste do Estado de São Paulo**. 89 f. Monografia. Fundação Educacional de Fernandópolis, Fernandópolis - SP, 2009.
- LÓPEZ-LÓPEZ, R.; RAMÍREZ, R. A.; SÁNCHEZ-COHEN, I.; BUSTAMANTE, W. O.; GONZÁLEZ-LAUACK, V. 2011. Evapotranspiration and crop water stress index in Mexican husk tomatoes (*Physalis ixocarpa* Brot). Evapotranspiration—From Measurements to Agricultural and Environmental Applications, p. 187-210.

LUDWIG, F.; BIEMANS, H.; JACOBS, C.; SUPIT, I.; VAN DIEPEN, C. A.; FAWELL, J.; STEDUTO, P. 2011. Water use of oil crops: current water use and future outlooks. **ILSI Europe aisbl**.

MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R. 2011. Irrigation requirements and transpiration coupling to the atmosphere of a citrus orchard in Southern Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 98, p. 1091–1096.

MARIN, F.R.; ZANON, A.J.; MONZON, J.P.; ANDRADE, J.F.; SILVA, E.H.F.M.; RICHTER, G.L.; ANTOLIN, L.A.S.; RIBEIRO, B.S.M.R.; RIBAS, G.G.; BATTISTI, R., HEINEMANN, A.B.; GRASSINI, P. 2022. Protecting the Amazon forest and reducing global warming via agricultural intensification. **Nature Sustainability**, p. 1-9.

MARK, M.; BABLA, M.; XU, S.-C.; O’CARRIGAN, A.; LIU, X.-H.; GONG, Y.-M.; HOLFORD, P.; CHEN, Z.-H. 2014. Leaf mesophyll K⁺, H⁺ and Ca²⁺ fluxes are involved in drought-induced decrease in photosynthesis and stomatal closure in soybean. **Environmental and Experimental Botany**, v. 98, p. 1–12.

MATHOBO, R.; MARAIS, D.; STEYN, J.M. 2017. The effect of drought stress on yield, leaf gaseous exchange and chlorophyll fluorescence of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Agricultural Water Management**, v. 180, p. 118–125.

MENDES, R.M.S.; TÁVORA, F.J.A.F.; PINHO, J.L.N.; 2007. PITOMBEIRA, J.B. Relações fonte-dreno em feijão-de-corda submetido à deficiência hídrica. **Ciência Agronômica**, v. 38, p. 95-103.

MILLER, E. C.; SAUNDERS, A. R. 1923. Some observations on the temperature of the leaves of crop plants. **Journal of Agricultural Research**, v. 26, p. 15.

MUNDSTOCK, C.M.; THOMAS, A.L. 2005. Soja: Fatores que afetam o crescimento e rendimento de grãos. **Evangraf**, p. 31.

NETO, J. D. S. 2015. **Estudo da interação genótipo X ambiente e validação de marcadores microssatélite associados a QTLs para conteúdo de óleo e proteína em soja**. Orientador: Taís Cristina Bastos Soares. Tese (Doutorado). Genética e Melhoramento. 73f.– Universidade Federal do Espírito Santo.

NIELSEN, D.C. 1990. Scheduling irrigations for soybeans with the Crop Water Stress Index (CWSI). **Field Crops Research**, v. 23, p. 103–116.

OECD; FAO. 2018. Agricultural outlook 2018-2027. OECD Publishing, Paris/Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

OLIVEIRA, A. S.; PAZ, V. P. S; D'ANGIOLELLA, G. L. B.; PEREIRA, F. A. C. 2005. Programação da irrigação pelo método do balanço de água no solo: aplicação – culturas anuais. **Revista Bahía Agrícola**, v. 7, n. 1.

OSROOSH, Y.; PETERS, R.T.; CAMPBELL, C.S.; ZHANG, Q. 2015. Automatic irrigation scheduling of apple trees using theoretical crop water stress index with an innovative dynamic threshold. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 118, p. 193–203.

PAIVA, A. S.; FERNANDES, E. J.; RODRIGUES, T. J.; TURCO, J. E. 2005. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. **Engenharia Agrícola**, v. 25, p. 161-169.

PARKASH, V.; SINGH, S. 2020. A review on potential plant-based water stress indicators for vegetable crops. **Sustainability**, v. 12, p. 3945.

PEREIRA, L.S.; PAREDES, P.; JOVANOVIC, N. 2020. Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach. **Agricultural Water Management**, v. 241, p. 106357.

PIMENTEL, O. D. S. 2021. **Manejo e aplicação da irrigação deficitária na cultura da soja Glycine max L.**

PRADAWET, C.; KHONGDEE, N.; PANSAK, W.; SPREER, W.; HILGER, T.; CADISCH, G. 2022. Thermal imaging for assessment of maize water stress and yield prediction under drought conditions. **Journal of Agronomy and Crop Science**.

QUILOANGO-CHIMARRO, C.A.; COELHO, R.D.; HEINEMANN, A.B.; ARRIETA, R.G.; da SILVA GUNDIM, A.; FRANÇA, A.C.F. 2022. Physiology, yield, and water use efficiency of drip-irrigated upland rice cultivars subjected to water stress at and after flowering. **Experimental Agriculture**, v. 58.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. 1997. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. **Instituto Agrônômico/Fundação IAC**, v. 100, p. 8-13.

RASHEED, M.W.; TANG, J.; SARWAR, A.; SHAH, S.; SADDIQUE, N.; KHAN, M.U.; IMRAN KHAN, M.; NAWAZ, S.; SHAMSHIRI, R.R.; AZIZ, M. 2022. Soil Moisture Measuring Techniques and Factors Affecting the Moisture Dynamics: A Comprehensive Review. **Sustainability**, v. 14, p. 11538.

RU, C.; HU, X.; WANG, W.; RAN, H.; SONG, T.; GUO, Y. 2020. Evaluation of the crop water stress index as an indicator for the diagnosis of grapevine water deficiency in greenhouses. **Horticulturae**, v. 6, p. 1–19.

SANTOS, L.C.; COELHO, R.D.; BARBOSA, F.S.; LEAL, D.P.V.; FRAGA JÚNIOR, E.F.; BARROS, T.H.S.; LIZCANO, J. V.; RIBEIRO, N.L. 2019. Influence of deficit irrigation on accumulation and partitioning of sugarcane biomass under drip irrigation in commercial varieties. **Agricultural Water Management**, v. 221, p. 322–333.

SEGOVIA-CARDOZO, D.A.; RODRÍGUEZ-SINOBAS, L.; ZUBELZU, S., 2019. Water use efficiency of corn among the irrigation districts across the Duero river basin (Spain): Estimation of local crop coefficients by satellite images. **Agricultural Water Management**, v. 212, p. 241–251.

SILVA, E. M.; DE AZEVEDO, J. A.; GUERRA, A. F.; FIGUERÊDO, S. F.; DE ANDRADE, L. M.; ANTONINI, J. D. A. 1999. **Manejo de irrigação por tensiometria para culturas de grãos na região do cerrado.**

SILVA, V. de P.R. da; SILVA, R.A.; MACIEL, G.F.; BRAGA, C.C.; SILVA, J.L.C. da; SOUZA, E.P. de; ALMEIDA, R.S.R.; SILVA, M.T.; HOLANDA, R.M. de; 2017. Calibration and validation of the AquaCrop model for the soybean crop grown under different levels of irrigation in the Motopiba region, Brazil. **Ciência Rural**, v. 48, p. 1-8.

SOBENKO, L.R.; SOUZA, T.T.; GONCALVES, A.O.; BIANCHINI, V.J.M.; SILVA, E.H.F.M.; SOUZA, L.T.; MARIN, F.R. 2019. Irrigation requirements are lower than those usually prescribed for a maize crop in southern Brazil. **Experimental Agriculture**, v. 55, p. 662–671.

SOUZA, S.A.; RODRIGUES, L.N. 2022. Increased profitability and energy savings potential with the use of precision irrigation. **Agriculture Water Management**, v. 270, p. 107730.

STEELE, D.D.; STEGMAN, E.C.; GREGOR, B.L. 1994. Field comparison of irrigation scheduling methods for corn. **Transactions of the ASAE**, v. 37, p. 1197–1203.

SUBBARAO, G.V.; JOHANSEN, C.; SLINKARD, A.E.; RAO, R.C.N.; SAXENA, N.P.; CHAUHA, Y.S. 1995. Strategies for improving drought resistance in grain legumes. **Critical Reviews in Plant Science**, v. 14, p. 469-529.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. 1991. Fisiologia vegetal. **Universitat Jaume I**, 2006.

TANWAR, B.; GOYAL, A. 2021. Oilseeds: health attributes and food applications. **Springer**.

THOMAZONI, D.; FORMENTINI, M. A.; ALVES, L. F. A. 2014. Patogenicidade de isolados de fungos entomopatogênicos à *Spodoptera frugiperda* (Smith)(Lepidoptera: Noctuidae). *Arquivos do Instituto Biológico*, v. 81, n. 2, p. 126-133.

van GENUCHTEN, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892–898.

van RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. 1997. Fertilization and liming recommendations for the State of São Paulo. Campinas: Instituto Agrônômico/Fundação IAC
 VEYSI, S., NASERI, A.A., HAMZEH, S., Bartholomeus, H., 2017. A satellite based crop water stress index for irrigation scheduling in sugarcane fields. **Agricultural Water Management**, v. 189, p. 70–86.

VEYSI, S.; NASERI, A. A.; HAMZEH, S.; BARTHOLOMEUS, H. 2017. A satellite based crop water stress index for irrigation scheduling in sugarcane fields. **Agricultural Water Management**, v. 189, p. 70-86.

VIJAYARAGHAVAREDDY, P.; XINYOU, Y.; STRUIK, P.C.; MAKARLA, U.; SREEMAN, S. 2020. Responses of lowland, upland and aerobic rice genotypes to water limitation during different phases. **Rice Science**, v. 27, p. 345–354.

WANG, D.; KANG, Y.; WAN, S. 2007. Effect of soil matric potential on tomato yield and water use under drip irrigation condition. **Agricultural Water Management**, v. 87, p. 180–186.

WEBBER, H. A.; MADRAMOOTOO, C. A.; BOURGAULT, M.; HORST, M. G.; STULINA, G.; SMITH, D. L. 2006. Water use efficiency of common bean and green gram grown using alternate furrow and deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 86, n. 3, p. 259-268.

YANG, X.; WANG, B.; CHEN, L.; LI, P.; CAO, C. 2019. The different influences of drought stress at the flowering stage on rice physiological traits, grain yield, and quality. **Scientific Reports**, v. 9, p. 1–12.

Y GARCIA, A. G.; PERSSON, T.; GUERRA, L. C.; HOOGENBOOM, G. 2010. Response of soybean genotypes to different irrigation regimes in a humid region of the southeastern USA. **Agricultural water management**, v. 97, n. 7, p. 981-987.

YI, J.; LI, H.; ZHAO, Y.; ZHANG, H.; LIU, M. 2022. Assessing soil water balance to optimize irrigation schedules of flood-irrigated maize fields with different cultivation histories in the arid region. **Agricultural Water Management**, v. 265, p. 107543.

YOHANNES, D.F.; RITSEMA, C.J.; EYASU, Y.; SOLOMON, H.; VAN DAM, J.C.; FROEBRICH, J.; RITZEMA, H.P.; MERESSA, A. 2019. A participatory and practical irrigation scheduling in semiarid areas: the case of Gumselassa irrigation scheme in Northern Ethiopia. **Agricultural Water Management**, v. 218, p. 102–114.

ZHANG, Z.; BARLAGE, M.; CHEN, F.; LI, Y.; HELGASON, W.; XU, X.; LIU, X.; LI, Z.; 2020. Joint modeling of crop and irrigation in the central United States using the Noah-MP land surface model. **Journal of Advances in Modeling Earth**, v. 12, n. 7, p. e2020MS002159.

ZIMMERMANN, U.; BITTER, R.; MARCHIORI, P.E.R.; RÜGER, S.; EHRENBERGER, W.; SUKHORUKOV, V.L.; SCHÜTTLER, A.; RIBEIRO, R.V. 2013. A non-invasive plant-based probe for continuous monitoring of water stress in real time: a new tool for irrigation scheduling and deeper insight into drought and salinity stress physiology. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 25, p. 2–11.

ZUFFO, A.M.; RATKE, R.F.; STEINER, F.; AGUILERA, J.G.; 2022. Agronomic characteristics of soybean cultivars with late-season nitrogen application in supplementation to the inoculation of *Bradyrhizobium* spp. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 46, p. 1-10.

APÊNDICES

Apêndice A. Valores médios de fotossíntese, condutância estomática, transpiração, eficiência intrínseca do uso da água e potencial hídrico foliar durante o estágio vegetativo para as três variedades de soja submetidas a diferentes manejos de irrigação

	Fotossíntese ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)				Condutância estomática ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)			
	V1	V2	V3	Média	V1	V2	V3	Média
MS	23.78	24.33	23.77	23.96 a	0.83	0.79	0.78	0.80 a
MC	25.72	23.72	24.38	24.60 a	0.83	0.76	0.65	0.74 a
MP	15.13	11.69	13.85	13.55 b	0.29	0.13	0.22	0.21 b
Média	21.54 A	19.91 A	20.66 A		0.65 A	0.56 A	0.55 A	
M				**				**
V				ns				ns
M x V				ns				ns
	Transpiração ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)				Eficiência intrínseca do uso da água ($\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$)			
	V1	V2	V3	Média	V1	V2	V3	Média
MS	12.53	12.36	12.48	12.46 a	30.45	31.45	30.77	30.89 b
MC	13.11	12.63	10.63	12.12 a	31.77	31.59	40.72	34.69 b
MP	6.16	4.58	4.74	5.16 b	94.62	117.46	107.12	106.4 a
Média	10.60 A	9.86 A	9.28 A		52.28 A	60.16 A	59.53 A	
M				**				**
V				ns				ns
M x V				ns				ns
Potencial hídrico foliar (-MPa)								
	V1	V2	V3	Média				
MS	2.13	2.40	2.47	2.33 a				
MC	2.33	2.00	1.80	2.04 a				
MP	2.07	2.80	2.53	2.46 a				
Média	2.17 A	2.40 A	2.27 A					
M				ns				
V				ns				
M x V				ns				

MS: manejo via solo, baseado do potencial matricial do solo; MC: manejo via clima, baseado na evapotranspiração e no balanço hídrico do solo; MP: manejo via planta, baseado na temperatura do dossel da cultura; V1: variedade TMG 7067; V2: variedade 58160RSF IPRO; V3: variedade NA 5909; M: manejos de irrigação; V: variedades; *: diferença significativa à 0,05; ** diferença significativa à 0,01; ns: não significativo. Médias seguidas por letras minúsculas distintas dentro de uma coluna e letras maiúsculas distintas dentro de uma linha são diferentes pelo teste LSD à 0,05.

Apêndice B. Valores médios de fotossíntese, condutância estomática, transpiração, eficiência intrínseca do uso da água e potencial hídrico foliar durante o estágio reprodutivo para as três variedades de soja submetidas a diferentes manejos de irrigação

	Fotossíntese ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)				Condutância estomática ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)			
	V1	V2	V3	Média	V1	V2	V3	Média
MS	22.65	18.72	17.14	19.50 a	0.89 Aa	0.47 Ba	0.32 Ba	0.56
MC	12.33	18.44	10.78	13.85 b	0.20 Bb	0.54 Aa	0.12 Bb	0.29
MP	21.67	21.75	21.10	21.51 a	0.73 Aa	0.68 Aa	0.48 Aa	0.63
Média	18.88 A	19.64 A	16.34 A		0.61	0.56	0.36	
M				**				*
V				ns				*
M x V				ns				*
	Transpiração ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)				Eficiência intrínseca do uso da água ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$)			
	V1	V2	V3	Média	V1	V2	V3	Média
MS	11.25 Aa	8.85 ABa	7.04 Ba	9.05	26.38 Bb	44.80 Ba	63.81 Ab	45.00
MC	5.40 Bb	8.71 Aa	3.64 Bb	5.92	70.78 Ba	44.14 Ca	105.62 Aa	73.51
MP	10.08 Aa	10.27 Aa	8.82 Aa	9.72	33.17 Ab	32.37 Aa	46.47 Ab	37.34
Média	8.91	9.28	6.50		43.44	40.44	71.97	
M				**				*
V				**				**
M x V				*				*
Potencial hídrico foliar (-MPa)								
	V1	V2	V3	Média				
MS	2.40 Ab	2.27 Aa	1.73 Ab	2.13				
MC	3.93 Aa	2.00 Ba	2.47 Ba	2.80				
MP	1.93 Ab	2.33 Aa	2.40 Aa	2.22				
Média	2.75	2.20	2.20					
M				*				
V				ns				
M x V				*				

MS: manejo via solo, baseado do potencial matricial do solo; MC: manejo via clima, baseado na evapotranspiração e no balanço hídrico do solo; MP: manejo via planta, baseado na temperatura do dossel da cultura; V1: variedade TMG 7067; V2: variedade 58i60RSF IPRO; V3: variedade NA 5909; M: manejos de irrigação; V: variedades; *: diferença significativa à 0,05; ** diferença significativa à 0,01; ns: não significativo. Médias seguidas por letras minúsculas distintas dentro de uma coluna e letras maiúsculas distintas dentro de uma linha são diferentes pelo teste LSD à 0,05.



Figura 16. Plantas de soja sob os diferentes manejos de irrigação. A: manejo via planta; B: manejo via solo; C: manejo via clima.

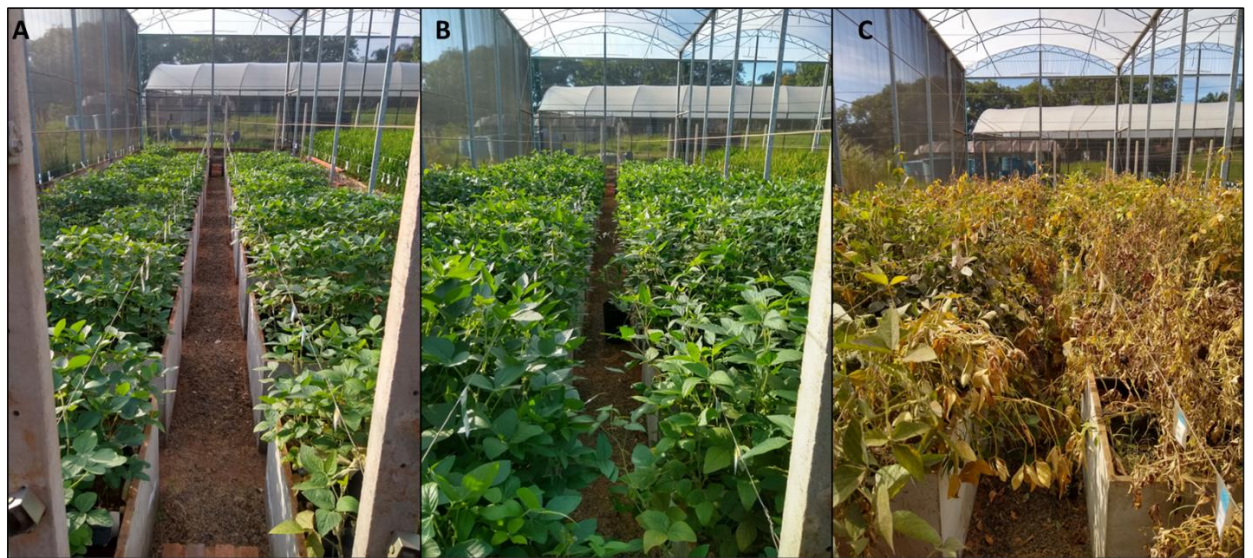


Figura 17. Condução da cultura. A: estágio vegetativo; B: estágio reprodutivo; C: senescência.