

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

Potencial de mitigação de perdas por déficit hídrico na cultura da soja pela aplicação dos fungos *Beauveria bassiana* e *Metarhizium anisopliae* no sulco de plantio

Alice da Silva Gundim

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

Piracicaba
2022

Alice da Silva Gundim
Bacharel em Engenharia Agrônômica

Potencial de mitigação de perdas por déficit hídrico na cultura da soja pela aplicação dos fungos *Beauveria bassiana* e *Metarhizium anisopliae* no sulco de plantio
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
2022

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

Gundim, Alice da Silva

Potencial de mitigação por déficit hídrico na cultura da soja pela aplicação dos fungos *Beauveria bassiana* e *Metarhizium anisopliae* no sulco de plantio / Alice da Silva Gundim. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2022.

82 p.

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

1. *Glycine max* (L.) Merrill 2. Eficiência do uso da água 3. Fungos endofíticos 4. Estresse hídrico I. Título

DEDICATÓRIA

A **Deus**, por ser essencial em minha vida e que guiou o meu caminho durante esta caminhada.

À minha mãe, **Davina** que com muito carinho, apoio e orações, não mediu esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida e compreensão nas longas horas em que tive que me dedicar para tornar este sonho realidade.

Às minhas mais que queridas irmãs, **Chris** e **Júlia**, por todo o suporte, momentos de alegria e confiança. Vocês sempre serão minha fonte de inspiração.

À minha avó **Maria Aldenora**.

À meu avô **Oscar** (in memória).

Enfim.

À minha querida família.

Vocês sempre serão minha referência, fonte de força e meu orgulho!

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ) e a Universidade de São Paulo (USP) pelo acolhimento e qualificação;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo concedida;

Ao Departamento de Biosistemas da ESALQ/USP, principalmente aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas pelos ensinamentos prestados.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rubens Duarte Coelho, pelos ensinamentos, exemplo profissional, paciência, oportunidades e por todo apoio dado para a realização deste trabalho.

Ao prof. Dr. Ítalo Delalibera Júnior pela proposta de trabalho em parceria com o Prof. Rubens Coelho nesta área de interface de conhecimento dos Departamentos LEB e LEA da ESALQ, colocando à disposição seu laboratório e a pós-doutoranda Camila Moreira e a aluna de PIBIC Alice Horii, que auxiliaram no preparo dos inoculantes e na discussão da metodologia deste trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Biosistemas da ESALQ/USP pela fundamental colaboração e atitude sempre prestativa.

Aos colegas do Laboratório de Irrigação da ESALQ/USP, pelo aprendizado, amizade e colaboração com as tarefas, em especial à Carol, Carlos, Júnior e Michele, sem os quais, esta jornada não teria sido a mesma.

À Kamila Sotero, amizade criada durante as disciplinas do Mestrado, pelo apoio nos trabalhos.

À Raimunda Alencar, sem seu apoio incondicional não teria sido possível esta conquista, meu sincero muito obrigado.

Às minhas amigas de infância Jane e Carol pela amizade, aprendizagem, apoio e momentos felizes desde sempre.

A toda equipe da empresa Compass Minerals, pelo apoio, gentileza e prontidão em soluções, que contribuíram no processo de instalação do experimento através do fornecimento de insumos.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que fosse possível a realização deste trabalho, a elaboração da dissertação e conclusão deste curso.

EPÍGRAFE

“O papel do infinitamente pequeno é infinitamente grande”

Louis Pasteur

“Acima de tudo seja bom. A bondade mais do
que outra coisa desarma os homens”

Henri Lacordaire

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	12
1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. A cultura da soja.....	15
2.1.1. Importância alimentar, econômica e produtiva.....	15
2.1.2. Aspectos ecofisiológicos da soja.....	15
2.1.2.1. Características agronômicas.....	15
2.1.2.2. Requerimentos edafoclimáticos.....	16
2.1.2.3. Cultivares, épocas de semeadura e locais de cultivo.....	17
2.1.2.4. Fenologia.....	18
2.2. Eficiência do uso da água nos cultivos.....	19
2.3. Efeitos do déficit hídrico na soja.....	21
2.4. Fungos entomopatogênicos e relação endofítica com plantas.....	23
3. MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1. Caracterização do local do experimento	27
3.2. Delineamento experimental	28
3.3. Condução do experimento.....	29
3.3.1. Preparo dos fungos entomopatogênicos e solução inoculante.....	29
3.3.2. Plantio.....	30
3.3.3. Tratos culturais.....	31
3.3.4. Sistema e manejo da irrigação.....	32
3.3.5. Mensuração de dados meteorológicos.....	33
3.4. Variáveis analisadas.....	34
3.4.1. Rendimento de grãos e componentes de rendimento e crescimento.....	34
3.4.2. Variáveis fisiológicas.....	34
3.4.3. Potencial hídrico foliar.....	35
3.4.4. Eficiência do uso da água.....	35
3.4.5. Índice de colheita.....	35

3.5. Análise estatística.....	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	377
4.1. Parâmetros meteorológicos durante o experimento	37
4.2. Manejo da irrigação e consumo hídrico	38
4.3. Efeito da irrigação sob déficit nos componentes de rendimento de grãos, rendimento de grãos, eficiência do uso da água e índice de colheita.....	39
4.4. Respostas fisiológicas ao déficit hídrico.....	49
5. CONCLUSÃO.....	59
REFERÊNCIAS	61
APÊNDICES	75
ANEXOS	77

RESUMO

Potencial de mitigação de perdas por déficit hídrico na cultura da soja pela aplicação dos fungos *Beauveria bassiana* e *Metarhizium anisopliae* no sulco de plantio

A cultura da soja é cultivada em diferentes regiões no mundo, com os mais diversos regimes de chuvas. Neste cenário, o déficit hídrico é um dos principais problemas nesta cultura de sequeiro que resultam perdas significativas de rendimento de grãos no campo, com isso, o uso de fungos entomopatogênicos pode ser uma estratégia de promover crescimento vegetal e ainda, atenuar os impactos do déficit hídrico sobre as plantas de maneira a mitigar danos econômicos significativos aos agricultores. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar as respostas ao déficit hídrico de rendimento de grãos, componentes de rendimento e crescimento, e fisiológicos da soja inoculada com fungos entomopatogênicos sob irrigação de precisão com estratégias de irrigação plena e deficitária. O experimento foi conduzido em ambiente protegido da chuva no Departamento de Engenharia de Biosistemas – ESALQ/USP, usando-se um delineamento inteiramente casualizado com um arranjo de parcelas subdivididas com quatro repetições. Os tratamentos nas parcelas correspondem a nove manejos de irrigação: 100 (I100), 70 (I70) e 50% (I50), que são frações da lâmina de irrigação de referência para se manter a umidade do solo no ponto de capacidade de campo durante todo o ciclo de cultivo (VFR); 70 e 50% na fase vegetativa (V); 70 e 50% na fase de floração (F) e 70 e 50% na fase de enchimento de grãos (R), submetidos nas subparcelas a inoculação com *Bradyrhizobium japonicum* (BJ), coinoculado com *Beauveria bassiana* (BB) e *Metarhizium anisopliae* (MA). O rendimento de grãos e os componentes de rendimento e crescimento foram afetados pela irrigação com déficit hídrico com maior intensidade no inoculante MA. O estresse hídrico resultou em uma redução na taxa fotossintética, condutância estomática e transpiração, e um aumento na eficiência intrínseca do uso da água. O potencial hídrico da folha também foi afetado pela restrição hídrica. Em condições bem regadas, a eficiência do uso da água variou entre 0,90 e 1,19 kg m⁻³. Conclui-se que a soja sendo uma cultura cuja produtividade é muito dependente da disponibilidade de água no solo, a imposição de déficit hídrico interferiu em todas as fases fenológicas e variáveis estudadas. Assim, os fungos entomopatogênicos ajudaram a manter a produtividade da soja sobre estresse moderado na fase de floração, mas com penalidade nas demais fases de imposição de estresse. De modo geral, os tratamentos inoculados com BB proporcionaram os melhores resultados de rendimento de grãos e nos componentes de rendimento e crescimento que MA quando as plantas ficaram sobre algum tipo de estresse hídrico.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merrill, Eficiência do uso da água, Fungos endofíticos, Estresse hídrico

ABSTRACT

Potential for mitigation of losses due to water deficit in soybean crop by the application of the fungi *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* in the planting groove

Soybean is cultivated in different regions of the world, with the most diverse rainfall regimes. In this scenario, the water deficit is one of the main problems in this rainfed crop that result in significant losses of grain yield in the field, with this, the use of entomopathogenic fungi can be a strategy to promote plant growth and also, mitigate the impacts of the deficit. water on plants in order to mitigate significant economic damage to farmers. Thus, the objective of this work was to evaluate the water deficit responses of grain yield, yield and growth components, and physiological responses of soybean inoculated with entomopathogenic fungi under precision irrigation with full and deficit irrigation strategies. The experiment was carried out in a protected environment from rain at the Department of Biosystems Engineering – ESALQ/USP, using a completely randomized design with a split-plot arrangement with four replications. The treatments in the plots correspond to nine irrigation managements: 100 (I100), 70 (I70) and 50% (I50), which are fractions of the reference irrigation depth to maintain soil moisture at the point of field capacity during whole growing cycle (VFR); 70 and 50% in the vegetative phase (V); 70 and 50% in the flowering phase (F) and 70 and 50% in the grain filling phase (R), submitted in the subplots to inoculation with *Bradyrhizobium japonicum* (BJ), co-inoculated with *Beauveria bassiana* (BB) and *Metarhizium anisopliae* (MA). Grain yield, yield and growth components were affected by irrigation with water deficit with greater intensity in the MA inoculant. Water stress resulted in a reduction in photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration, and an increase in intrinsic water use efficiency. Leaf water potential was also affected by water restriction. Under well-watered conditions, the water use efficiency ranged between 0.90 and 1.19 kg m⁻³. It is concluded that soybean, being a crop whose productivity is very dependent on the availability of water in the soil, the imposition of water deficit interfered in all phenological phases and variables studied. Thus, entomopathogenic fungi helped to maintain soybean productivity under moderate stress in the flowering phase, but with a penalty in the other phases of stress imposition. In general, treatments inoculated with BB provided better results in grain yield and in yield and growth components than MA when the plants were under some type of water stress.

Keywords: *Glycine max* (L.) Merrill, Water use efficiency, Endophytic fungi, Water stress

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Distribuição de grupos de maturidade relativa de cultivares de soja no Brasil, em função da latitude. Fonte: KASTER e FARIAS (2011). 18
- Figura 2. A – Estufa do Departamento de Biossistemas; b – parcelas experimentais.....27
- Figura 3. Croqui do esquema experimental.29
- Figura 4. Isolados fúngicos (1), propagação dos isolados em arroz pré-cozido (2) e formação da solução inoculante (3).....30
- Figura 5. Semeadura (1) e inoculação dos fungos nos sulcos de plantio (2).31
- Figura 6. Registros diários da temperatura máxima, mínima e média do ar coletadas pela estação meteorológica durante o ciclo da soja irrigada por gotejamento na região de Piracicaba, São Paulo, 2020/21. V – vegetativo, F – floração, R – enchimento e maturação de grãos37
- Figura 7. Potencial de água no solo para o tratamento referencial de 100% da CAD (I100VFR) ao longo do ciclo cultural para três profundidades aferidas. V – vegetativo, F – floração, R – enchimento e maturação de grãos...38
- Figura 8. Rendimento de grãos da soja em kg ha⁻¹ em função da interação de manejos de irrigação e inoculantes. I100VFR – 100% da CAD ao longo do ciclo completo; I70VFR – 70% da CAD ao longo do ciclo completo; I70V – 70% na fase vegetativa; I70F – 70% na fase de floração; I70R – 70% na fase de enchimento de grãos; I50VFR – 50% da CAD ao longo do ciclo completo; I50V – 50% da CAD na fase vegetativa; I50F – 50% na fase de floração; I50R – 50% da CAD na fase de enchimento de grãos. Inoculantes: BJ – *Bradyrhizobium japonicum*; BB – *Beauveria bassiana*; MA – *Metarhizium anisopliae*. Médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem pelo teste LSD a nível de 5% de significância para cada inoculante nos diferentes manejos de irrigação. Médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem pelo teste LSD a nível de 5% de significância para diferentes inoculantes dentro de cada manejo de irrigação.....41
- Figura 9. Eficiência do uso da água e índice de colheita de soja inoculada submetida a nove manejos de irrigação. Os dados indicam a média ± EP (erro padrão). I100VFR – 100% da CAD ao longo do ciclo completo; I70VFR – 70% da CAD ao longo do ciclo completo; I70V – 70% na fase vegetativa; I70F – 70% na fase de floração; I70R – 70% na fase de enchimento de grãos; I50VFR – 50% da CAD ao longo do ciclo completo; I50V – 50% na fase vegetativa; I50F – 50% na fase de floração; I50R – 50% na fase de enchimento de grãos. Inoculantes: BJ – *Bradyrhizobium japonicum*; MA – *Beauveria bassiana*; MA – *Metarhizium anisopliae*. Médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem pelo teste LSD a nível de 5% de significância para cada inoculante nos diferentes manejos de irrigação. Médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem pelo teste LSD a nível de 5% de significância para diferentes inoculantes dentro de cada manejo de irrigação.....48
- Figura 10. Características de trocas gasosas de soja inoculada com fungos entomopatogênicos submetida a nove manejos de irrigação. A, taxa fotossintética (A); B, condutância estomática (gs); C, transpiração (E) e D, eficiência intrínseca do uso da água (iEUA) na fase vegetativa e reprodutiva. *, **, *** indicam diferenças significativas nos níveis de 0,05, 0,01 e 0,001, respectivamente, de BJ dentre os inoculantes, dentro de manejos de irrigação. I100VFR – 100% da CAD ao longo do ciclo completo; I70VFR – 70% da CAD ao longo do ciclo completo; I70V – 70% na fase vegetativa; I70F – 70% na fase de floração; I70R – 70% na fase de enchimento de grãos; I50VFR – 50% da CAD ao longo do ciclo completo; I50V – 50% na fase vegetativa; I50F – 50% na fase de floração; I50R – 50% na fase de enchimento de grãos. Inoculantes: BJ – *Bradyrhizobium japonicum*; MA – *Beauveria bassiana*; MA – *Metarhizium anisopliae*.51

Figura 11. Potencial hídrico foliar (PHF) de soja inoculada com fungos entomopatogênicos submetida a nove manejos de irrigação. Os dados indicam a média \pm EP (erro padrão). PHF na fase vegetativa e reprodutiva. *, ** e *** indicam diferenças significativas nos níveis de 0,05, 0,01 e 0,001, respectivamente, de BJ dentre os inoculantes, dentro de manejos de irrigação. I100VFR – 100% da CAD ao longo do ciclo completo; I70VFR – 70% da CAD ao longo do ciclo completo; I70V – 70% na fase vegetativa; I70F – 70% na fase de floração; I70R – 70% na fase de enchimento de grãos; I50VFR – 50% da CAD ao longo do ciclo completo; I50V – 50% na fase vegetativa; I50F – 50% na fase de floração; I50R – 50% na fase de enchimento de grãos. Inoculantes: BJ – *Bradyrhizobium japonicum*; MA – *Beauveria bassiana*; MA – *Metarhizium anisopliae*. 53

Figura 12. Correlações (coeficiente de correlação de Pearson) entre as medidas das características fisiológicas, produtividade e componentes de rendimento, para cada um dos períodos de mensurações das trocas gasosas. AIPL – altura de inserção do primeiro legume; EUA – eficiência do uso da água; PP – produtividade potencial; IC – índice de colheita; PHF – potencial hídrico foliar; MCG – massa de cem grãos; gs – condutância estomática; A – taxa de fotossíntese líquida; E – transpiração; iEUA – eficiência intrínseca do uso da água; IAF – índice de área foliar máximo; D - diâmetro; NV – número total de vagens por planta; NN – número total de nós por vagem.....55

Figura 13. Análise de componentes principais (PCA). Parcelas de pontuação de local das variáveis estudadas nos manejos empregados, de acordo com os três inoculantes usados na soja. Eficiência do uso de água, EUA; produtividade, PP; índice de colheita, IC; altura de inserção do primeiro legume, AIPL; número de nós, NN; altura de plantas, AP; índice de área foliar máximo, IAF; massa de cem grãos, MCG; número de vagens, NV; potencial hídrico foliar, PHF; taxa de fotossíntese líquida, A; condutância estomática, gs; transpiração, E e eficiência intrínseca do uso da água, iEUA. 56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição dos estádios vegetativo e reprodutivo da soja	19
Tabela 2. Resultados das análises químicas do solo da área experimental, ESALQ/USP, Piracicaba, 2020	28
Tabela 3. Descrição da composição dos manejos de irrigação	28
Tabela 4. Planejamento de adubações foliares ao longo da condução do experimento.....	32
Tabela 5. Registros mensais dos dados meteorológicos na estufa ao longo do período experimental, durante o ciclo da soja irrigada por gotejamento na região de Piracicaba, São Paulo, 2020/21.....	38
Tabela 6. Análise de variância (valor F) correspondente ao rendimento de grãos e componentes de rendimento em função da interação de manejos de irrigação e inoculação, Piracicaba, SP, 2020	40
Tabela 7A. Valores médios de componentes de rendimento e crescimento em função da interação de manejos de irrigação e inoculação. I100VFR – 100% da CAD ao longo do ciclo completo; I70VFR – 70% da CAD ao longo do ciclo completo; I70V – 70% na fase vegetativa; I70F – 70% na fase de floração; I70R – 70% na fase de enchimento de grãos; I50VFR – 50% da CAD ao longo do ciclo completo; I50V – 50% na fase vegetativa; I50F – 50% na fase de floração; I50R – 50% na fase de enchimento de grãos. inoculantes: BJ – <i>Bradyrhizobium japonicum</i> ; MA – <i>Beauveria bassiana</i> ; MA – <i>Metarhizium anisopliae</i>	43
Tabela 7B. Valores médios de componentes de rendimento e crescimento em função da interação de manejos de irrigação e inoculação. I100VFR – 100% da CAD ao longo do ciclo completo; I70VFR – 70% da CAD ao longo do ciclo completo; I70V – 70% na fase vegetativa; I70F – 70% na fase de floração; I70R – 70% na fase de enchimento de grãos; I50VFR – 50% da CAD ao longo do ciclo completo; I50V – 50% na fase vegetativa; I50F – 50% na fase de floração; I50R – 50% na fase de enchimento de grãos. inoculantes: BJ – <i>Bradyrhizobium japonicum</i> ; MA – <i>Beauveria bassiana</i> ; MA – <i>Metarhizium anisopliae</i>	44
Tabela 8. Valores médios de índice de área foliar máximo em função da interação de manejos de irrigação e inoculantes. I100VFR – 100% da CAD ao longo do ciclo completo; I70VFR – 70% da CAD ao longo do ciclo completo; I70V – 70% na fase vegetativa; I70F – 70% na fase de floração; I70R – 70% na fase de enchimento de grãos; I50VFR – 50% da CAD ao longo do ciclo completo; I50V – 50% na fase vegetativa; I50F – 50% na fase de floração; I50R – 50% na fase de enchimento de grãos. inoculantes: BJ – <i>Bradyrhizobium japonicum</i> ; MA – <i>Beauveria bassiana</i> ; MA – <i>Metarhizium anisopliae</i>	45
Tabela 9. Análise de variância (valor F) correspondente aos parâmetros fisiológicos em função da interação de manejos de irrigação e inoculação na soja, Piracicaba, SP, 2020.....	49

1. INTRODUÇÃO

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é a oleaginosa mais produzida e comercializada no Brasil e no mundo, espécie agrícola que devido à sua versatilidade de utilização e qualidade nutricional é empregada para diversas finalidades como alimentação humana e animal, extração de óleo, produção de biodiesel e forragicultura (CONAB, 2019; MATTOS, 2015). Sua importância econômica e social se deve à composição química de seus grãos, que apresentam de 30% a 40% de proteínas, uma ótima fonte de baixo custo e de elevada qualidade, rica nos aminoácidos arginina, leucina e lisina; possui de 15% a 25% de óleo e, ainda contém importantes macronutrientes e micronutrientes (BORDINGNON e MANDARINO, 1994; SILVA et al., 2006a).

Segundo o relatório do CONAB (2022), o Brasil obteve produção de 138 milhões de toneladas desta oleaginosa na safra 2020/2021 e, as projeções indicam queda da produção para 122 milhões de toneladas na safra 2021/2022, em decorrência de estiagens nas diversas regiões produtoras. Devido a relevância do produto soja para o país, tem-se que as atividades agrícolas requerem resultados satisfatórios quanto à eficiência econômica das práticas empreendidas assim, estratégias de manejo da cultura devem ser avaliadas, buscando-se reduzir os riscos e obter maior rentabilidade da produção por área.

Na cultura da soja, os fatores determinantes a serem considerados no manejo da cultura, em vista ao seu desempenho e potencial produtivo, segundo Alliprandini et al. (2009) e Zanon et al. (2015), envolvem as condições climáticas, características específicas das cultivares de soja, como o grau de maturidade relativa (GMR), em que a escolha da cultivar pode resultar em cultivar inadequada para determinada região, e ainda, os níveis de tolerância ao déficit hídrico.

O déficit hídrico é a principal causa climática responsável pelas perdas de produtividade nas regiões produtoras de soja no país, em média de 1.373 kg ha⁻¹ (± 543) seja ele ocasionado por períodos de estiagem ou irrigação ineficiente (FARIAS et al., 2001; SENTELHAS et al., 2015). Condições de intensificação de déficit hídrico no solo em área de produção de soja, em decorrência das mudanças climáticas devido aquecimento global, estarão intensificando estas perdas de produtividade da soja em território nacional (GORNALL et al., 2010; IPCC, 2018).

A cultura da soja responde às condições hídricas do solo, sejam elas de excesso ou deficiência hídrica, nos diversos estádios de desenvolvimento da cultura; ocasionam por exemplo, principalmente, a diminuição da produtividade (FARIAS et al., 2007). De acordo com Gava et al. (2015) a deficiência hídrica no solo nos períodos de floração e enchimento dos grãos provoca o abortamento de flores e vagens jovens, reduzindo em 45,22% a produtividade.

Visto isso, a disponibilidade de água no período indicado e a quantidade eficiente para suprir a necessidade hídrica das plantas, estabelece o manejo apropriado, por exemplo da irrigação na soja. A

maximização da produtividade da cultura, a minimização do uso da água e do custo de energia, o aumento da eficácia de adubos e a manutenção e aprimoramento das condições físicas e químicas do solo, assim como a diminuição da incidência de doenças, são os propósitos estabelecidos desse manejo (FLUMIGNAN et al., 2015; FRIZZONE et al., 2005).

No entanto, uma prática de manejo promissora na agricultura mais tecnificada, é a utilização de fungos entomopatogênicos em associação com plantas, promovendo uma associação simbiótica que proporciona aumento da absorção de nutrientes e água, proteção contra patógenos e induz maior tolerância a estresses abióticos; como o estresse hídrico, estimulando o crescimento e desenvolvimento do vegetal, reduzindo os riscos climáticos durante a condução das lavouras (ALMEIDA et al., 2014; PORCEL e RUIZ-LOZANO, 2004).

Assim, a hipótese deste trabalho é que a tolerância ao estresse hídrico de cultivar de soja em simbiose benéfica com fungos entomopatogênicos possam ser também consideradas, auxiliando na identificação da faixa de déficit hídrico capaz de melhor otimizar a irrigação, sem perda de produtividade esperada. Este tipo de tecnologia é de grande interesse dos agricultores, bem como da comunidade científica, visto que poderá propiciar maior segurança de produtividade em áreas de sequeiro e irrigadas sob déficit.

1.1 Objetivo geral

Estudar o comportamento de cultivar convencional de soja submetida à estresse hídrico e a relação do impacto do estresse com a inoculação de fungos entomopatogênicos sobre parâmetros de crescimento e produção da cultura.

Seus objetivos específicos são:

- a) verificar as relações hídricas, consumo e eficiência do uso da água da soja em função de manejos de irrigação e inoculação;
- b) avaliar parâmetros fisiológicos (assimilação de CO₂ e trocas gasosas);
- c) identificar qual manejo de irrigação e inoculação proporcionarão melhores resultados de rendimento de grãos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A cultura da soja

2.1.1. Importância alimentar, econômica e produtiva

No mundo, os principais produtores de soja são Brasil, Estados Unidos, Argentina e China, respectivamente com 127,0, 120,7, 43,5 e 16,4 milhões de toneladas de grãos, estimativas para a safra 2021/22 (USDA, 2022). No cenário nacional, considerando o mesmo período, a estimativa da área plantada da oleaginosa foi de 40.703,6 ha e produtividade média de 3.016 kg ha⁻¹ (CONAB, 2022).

Além de representatividade na economia mundial, a soja também tem um importante papel na segurança alimentar, uma vez que é um dos grãos mais consumidos do mundo, principalmente na indústria, e ainda tem um grande potencial de expansão, como previsto pela FAO (2017). De acordo com previsões esse grão será responsável por 62% da expansão da área cultivada até 2027 na América Latina e Caribe, fomentado pela demanda crescente da pecuária e aquicultura, sendo o Brasil um dos principais responsáveis por suprir esta demanda mundial na próxima década FAO (2017).

E essa representatividade da cultura no agronegócio brasileiro é tanta que 70% da soja produzida é exportada na forma dos produtos grãos, farelo e óleo, representando nos últimos anos o maior faturamento na pauta de exportações (BRANDALIZZE, 2017).

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] tem seu centro de origem no continente asiático, no nordeste da China, conhecida como região da Manchúria, onde é encontrada grande diversidade desta espécie (HYMOWITZ, 1970). Já no Brasil, foi introduzida através de imigrantes japoneses em 1908 no estado de São Paulo, no entanto foi no Rio Grande do Sul que a soja apresentou melhor desenvolvimento e expansão do seu cultivo devido as condições climáticas favoráveis semelhantes a região de origem. Atualmente, o cultivo da soja é realizado em todas as regiões do país (EMBRAPA, 2011).

2.1.2. Aspectos ecofisiológicos da soja

2.1.2.1. Características agronômicas

Das espécies do gênero *Glycine* descritas, a *Glycine max* foi a única cultivada e domesticada. A espécie é classificada dentro da Divisão Magnoliophyta (Spermatophyta), Classe Magnoliopsida (Dicotiledôneas), Subclasse Rosidae, Ordem Rosales, Família Fabaceae e Subfamília Papilionideae. Planta herbácea de ciclo vegetativo anual de 70 a 200 dias, ramificada de hábito de crescimento ereto, semi-ereto ou prostrado, onde as variedades comerciais podem apresentar tipo de crescimento

determinado (com racemo terminal), semideterminado (intermediário) ou indeterminado (sem racemo terminal). Possuem folhas trifolioladas e desenvolvem legumes, ditas vagens (contendo de uma a cinco sementes cada) na cor cinza ou marrom, de várias tonalidades; sistema radicular extenso, constituído de raíz principal e secundária, com predomínio de raízes nos primeiros 40 cm do solo (COSTA, 1996; SEDIYAMA et al., 2015).

A espécie é monóica, de autofecundação acima de 95% e cleistógama, em que as flores da soja se desenvolvem em racemos axilares ou terminais nas cores branca ou roxa. A hidridação é sobretudo natural, através de mecanismos físicos, químicos e biológicos. Após cerca de 20 a 25 dias da fecundação e floração, as sementes da soja atingem o seu máximo crescimento, atingindo 13% de umidade nos grãos, ideal para a colheita e armazenamento (MARCOS FILHO, 1980).

2.1.2.2. Requerimentos edafoclimáticos

De acordo com Kurihara (2004) em estudo da demanda e marcha de absorção de nutrientes na soja, o conhecimento das exigências nutricionais de qualquer espécie é imprescindível para entender os efeitos de clima e solo sobre a cultura e, por consequência nutrir adequadamente as plantas, conforme o estágio de desenvolvimento em que se apresentam.

Sendo uma oleaginosa de ciclo cultural curto, demanda grandes quantidades de nutrientes em pouco período. Kurihara et al. (2013), constataram que a ordem decrescente de macro e micronutrientes acumulados pela soja foi de N>K>Ca>P>Mg e Fe>Zn>Mn>Cu>B, respectivamente, em que o período de maior absorção dos elementos minerais, mediante acúmulo de massa seca da parte aérea, correspondeu aos 44 e 65 dias após a emergência de plântulas.

O nitrogênio é o nutriente mais importante para o incremento da produção de soja, seu aporte é realizado através da fixação biológica de nitrogênio (FBN). Segundo Hungria et al. (2007), por intermédio da associação simbiótica da soja e rizóbios produzidos pelas bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, cerca de 72 a 94% da demanda nutricional de N é provido pela FBN, sendo o restante da demanda obtida pela matéria orgânica do solo. Em vista disso, não há necessidade de efetuar a adubação nitrogenada da cultura da soja quando se procede a introdução das bactérias fixadora de N₂ no cultivo por meio da inoculação das sementes, prática realizada previamente ao plantio da cultura (CÂMARA, 2000; SEDIYAMA et al., 2015).

Os demais macronutrientes e micronutrientes são fornecidos de acordo com as recomendações de adubações, segundo os níveis de disponibilidade dos mesmos no solo; tipo de sistema de produção adotado, convencional ou orgânico, ou ainda, quanto à produtividade esperada. São fatores que

considerados em um adequado manejo agrícola irão interferir positivamente no controle de pragas, doenças e plantas daninhas (SENTELHAS et al., 2016).

Quanto às exigências térmicas da cultura para seu crescimento e desenvolvimento, as condições ótimas de temperatura do ar estão entre 20 e 30 °C, com temperatura ideal em torno de 30 °C (GIANLUPPI et al., 2009; EMBRAPA, 2011; FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).

2.1.2.3. Cultivares, épocas de semeadura e locais de cultivo

Quanto as características agronômicas, as cultivares comerciais de soja são classificadas quanto a duração total do ciclo, reunindo-as em grupos de maturação. A classificação engloba a interação dos fatores fotoperíodo, temperatura do ar e a adaptabilidade ao local de cultivo, no total as cultivares são divididas em 13 grupos de maturidade relativa (GMR) em uma escala de 000 a 10 (ALLIPRANDINI et al., 2009).

No Brasil, são empregadas cultivares de GRM de 5 a 9, adaptadas às condições climáticas tropicais, de acordo com as áreas produtoras de soja no país (EMBRAPA, 2011).

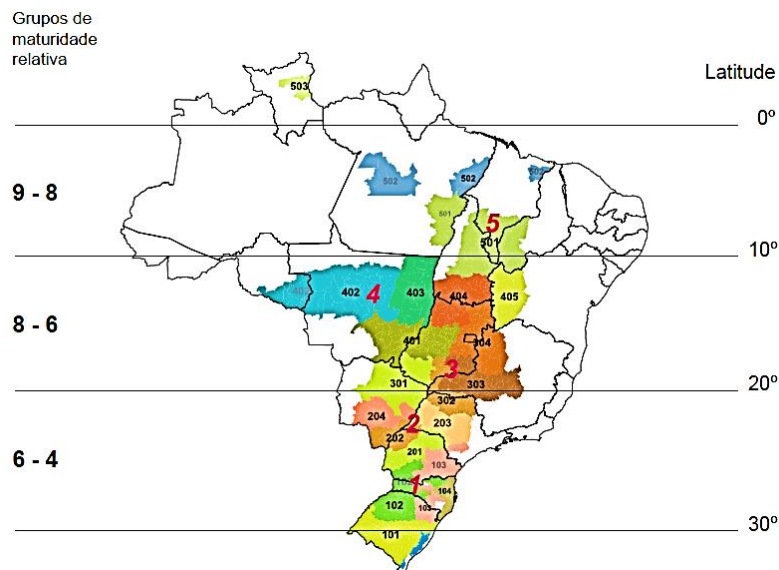


Figura 1. Distribuição de grupos de maturidade relativa de cultivares de soja no Brasil, em função da latitude. Fonte: KASTER e FARIAS (2011).

Dentro deste zoneamento agroclimático, os genótipos comerciais ainda são distinguidos quanto à tecnologia empregada no melhoramento genético das cultivares. De acordo com Vilela et al. (2016) o melhoramento genético da soja trouxe às plantas resistência a pragas, doenças, nematoides e herbicidas, tolerância à seca e geadas; assim tem-se cultivares com tecnologia do tipo Sistema Intacta (RR2 PRO™), com cultivares resistentes ao glifosato (*Roundup Ready* - RR); Soja RR, resistente ao glifosato, porém sem taxa tecnológica de organismos geneticamente modificados (OGM's) e Soja Convencional, sem taxa tecnológica de OGM's.

2.1.2.4. Fenologia

O manejo da cultura da soja envolve a identificação dos estádios de crescimento e desenvolvimento vegetativo. Conforme Ritchie et al. (1997), o sistema de identificação empregado para descrição dos estádios fenológicos da soja, segundo a escala de Fehr e Caviness (1977) e adaptado pelo MAPA (2013) é dividido em vegetativo (V) e reprodutivo (R).

Na tabela 1 são apresentados os estádios fenológicos da soja, o vegetativo, caracterizado pelo crescimento em massa fresca das plantas, numerado de acordo com o número de folhas completamente desenvolvidas antes da floração, quando então, inicia-se o estágio reprodutivo, caracterizado pelo desenvolvimento e diferenciação da estrutura vegetal, período compreendido entre a antese (R1) e hibridação natural até a maturidade fisiológica (R8), quando os grãos da soja alcançam o máximo de acúmulo de peso e vigor (NEUMAIER et al., 2000).

Tabela 1. Descrição dos estádios vegetativo e reprodutivo da soja.

Estádios de desenvolvimento	Descrição
1. Fase vegetativa	
VC	Da emergência a cotilédones abertos
V1	Primeiro nó; folhas unifolioladas abertas
V2	Segundo nó; primeiro trifólio aberto
V3	Terceiro nó; segundo trifólio aberto
Vn	Enésimo nó; com trifólio aberto antes da floração
2. Fase reprodutiva – Observação na haste principal	
R1	Início da floração: 50% das plantas com uma flor aberta
R2	Floração plena: maioria dos racemos com flores abertas
R3	Início de formação de vagens: vagens com 5 mm no quarto nó da parte superior das plantas
R4	Etapa final de crescimento das vagens: vagens com 2 a 4 cm no quarto nó da parte superior das plantas
R5	Início do desenvolvimento dos grãos à etapa final, no quarto nó da parte superior das plantas
R6	Enchimento completo das vagens: grãos enchendo totalmente as lojas das vagens no terço superior das plantas
R7	Maturação fisiológica: uma vagem madura e maioria delas amareladas no terço superior das plantas
R8	Maturação: 95% das vagens maduras (secas)

Fonte: Fehr e Caviness (1977); adaptado de MAPA (2013).

2.2. Eficiência do uso da água nos cultivos

O aumento da demanda de água no Brasil e no mundo para fins agrícolas, industriais e urbano, nos últimos anos, tem contribuído para o aumento da pressão sobre os recursos hídricos, a partir do aumento da população e das atividades econômicas intensivas em uso de água (ANA, 2019a). A irrigação tem grande relevância na economia agrícola brasileira e na promoção da segurança alimentar e nutricional da população, nesse contexto há uma perspectiva de expansão da irrigação até 2030 sobre três milhões de hectares, resultando em 40% de aumento do uso da água. Tendo em vista isso, essa expansão terá que ocorrer de forma sustentável tanto pela gestão dos recursos hídricos quanto para o próprio setor e para os demais usos da água (ANA, 2019b).

Nesta problemática, há questões inerentes quanto a conservação do meio ambiente, para aumento da produtividade dos cultivos não se pode simplesmente expandir as áreas de cultivos. Dessa forma, várias pesquisas foram e estão sendo desenvolvidas para a criação de novas técnicas e meios de cultivo que permitam o controle da expansão de novas áreas agrícolas exploradas, aliada a preservação de recursos naturais.

Dentre as pesquisas recentes geradas em prol do aumento da produtividade das culturas, destaca-se o conceito de manejo integrado da cultura, que considera aspectos de irrigação, solo, pragas e doenças, visando entender as complexas interações entre o meio ambiente e os mecanismos de desenvolvimento e crescimento das plantas (BARROS et al., 2005; BERGAMIN et al., 2010; FOLEGATTI et al., 2004).

Com isso, a produtividade nos cultivos é afetada pela influência de fatores externos no meio ambiente e também por fatores internos relacionados à constituição genética das espécies vegetais, assim, segundo Harper (1997) e Mundstock (1997), a produtividade final de uma cultura é definida pela relação entre a quantidade de recurso capturado por unidade de recurso disponível, resultando na eficiência de utilização do recurso, que é a quantidade de matéria seca produzida por unidade de recurso capturado.

Na questão hídrica dos cultivos, a análise da eficiência de captura do recurso água, serve de aporte a tomada de decisão quanto a otimização do uso da água na agricultura, uma vez que as reservas de água vem reduzindo e ainda há o agravante de regiões que apresentam má distribuição da precipitação pluviométrica (FAO, 2018).

Assim, o uso da eficiência do uso da água (EUA) como um indicador da resposta dos cultivos às condições de disponibilidade de água é fundamental, pois relaciona a produtividade obtida pela quantidade de água aplicada ou evapotranspirada pela cultura (GAO et al., 2009; LIU; STUZEL, 2004; PUPPALA et al., 2005).

Dentre as estratégias de sistemas e manejo de irrigação propostas para aumentar a EUA, destacam-se a irrigação de precisão através de sistema por microaspersão e gotejamento, que reduzem o volume de água aplicado por área em comparação com a aspersão convencional (FOLEGATTI et al., 2004), e ainda, irrigação sob déficit hídrico durante estádios de desenvolvimento menos crítico as plantas, sem que haja perda de produtividade (GEERTS; RAES, 2009).

De acordo com English e Navaid (1996), os benefícios da irrigação sobre déficit deve-se ao aumento da eficiência da irrigação, redução dos custos de irrigação e riscos associados aos impactos ambientais. Hargreaves e Samani (1984) citam que a irrigação deficitária controlada pode proporcionar retorno econômico superior aos obtidos com máxima irrigação. Portanto, seu emprego deve ser bem orientado.

Saad (1996) em estudo de irrigação deficitária como estratégia de manejo da água em feijoeiro, definiu que o déficit trouxe benefícios a receita líquida do produtor desde que não fosse aplicado nos estádios fenológicos da floração e enchimento de grãos.

Bergamaschi et al. (2004), aplicando lâminas de irrigação no período crítico do milho, concluíram que irrigações durante o período do pendramento ao início do enchimento de grãos permite elevada produtividade de grãos de milho.

Atti et al. (2005) estudando a resposta da soja sob déficit hídrico com aplicação de uma bactéria Rhizobial no florescimento e enchimento de grãos, constataram que a bactéria apresentou potencial de atenuar os efeitos do déficit hídrico.

Blanco et al. (2011) avaliando estratégias de irrigação no algodoeiro, observaram que cultivares de algodão não apresentaram redução no desenvolvimento vegetativo e na produtividade quando o déficit foi aplicado na fase que antecede o florescimento, ou na fase entre o florescimento e o aparecimento das maçãs.

Ainda em estudo com algodoeiro, Cordão et al. (2018), inferiram que tratamentos controle e com déficit nas fases de crescimento inicial e de capulho, obtiveram produtividade satisfatória em relação à média nacional.

Basso et al. (2015) usando estratégias de irrigação com déficit – ID e irrigação com déficit controlado – IDC aplicadas na videira, observaram que o número de cachos não foi afetado pelas estratégias de irrigação deficitária e quando aplicadas após o pegamento dos frutos, propiciaram uma economia na utilização da água.

Em cana-de-açúcar, a redução da lâmina de água (55, 70 e 85% da evapotranspiração da cultura) em três fases de seu desenvolvimento (brotação e perfilhamento, desenvolvimento e maturação) causou alterações em seu crescimento, assim, Simões et al. (2018) recomendam a aplicação de lâmina de 85% da etc. nas fases de maior desenvolvimento ou maturação da cultura, visando garantir maior eficiência do uso da água.

Em arroz, Concenço et al. (2018) atestaram que o déficit hídrico quando imposto na fase vegetativa (perfilhamento), o número de panículas é afetado significativamente, no entanto, se imposto após, na fase reprodutiva (após iniciação da panícula), não houve diferenças em relação ao fornecimento hídrico ao arroz sem restrições.

Em citros, Silveira et al. (2020) em estudo da produtividade da laranja Pera-IAC, observaram que a irrigação deficitária melhorou a qualidade dos frutos em comparação com as plantas de irrigação plena e ainda, foi capaz de aumentar a eficiência do uso da água, resultando em aumento da produtividade, qualidade e economia da água.

2.3. Efeitos do déficit hídrico na soja

O crescimento e desenvolvimento de plantas dependem, principalmente de seu manejo, conhecimento do potencial genético da cultivar e fatores ambientais. Dentre os fatores ambientais, a água é um dos insumos mais limitante da produtividade agrícola, uma vez que o processo de absorção

de nutrientes do solo é mediante a dois mecanismos de transporte: fluxo em massa e difusão (diferença de concentração entre meios) (OLIVEIRA et al., 2012; SOUZA, 2012).

Para Farias et al. (2007), a soja, mesmo sendo uma das culturas mais estudadas e com alto grau de tecnificação, a disponibilidade hídrica durante seu cultivo é a principal causa da limitação da expressão do seu potencial de rendimento, causando variabilidade dos rendimentos de grãos observados de um ano para outro.

De modo geral, estresse hídrico ao longo do desenvolvimento da soja pode culminar em plantas pouco desenvolvidas, baixa produtividade, diminuição da fitomassa, altura e tamanho de folhas, redução do índice de área foliar, alteração da duração dos estádios fenológicos, redução da FBN pelas bactérias, maior suscetibilidade de agentes patogênicos e menor eficiência da utilização da radiação solar (MANAVALAN et al., 2009; FARIAS et al., 2001; FIOREZE et al., (2011); SINCLAIR et al., 2007).

A demanda por água e nutrientes aumenta paralelo a taxa de crescimento e sobre os efeitos do déficit hídrico no solo na cultura da soja, a água é importante durante todo o seu desenvolvimento, no entanto o período que compreende a germinação-emergência e a floração e enchimento de grãos (determinantes ao potencial de produção de grãos) são ditos críticos (SEDIYAMA et al., 2015; FARIAS et al., 2007).

E a necessidade total de água durante o ciclo cultural varia de 450 a 800 mm/ciclo, a depender das condições edafoclimáticas, manejo da cultura e cultivar (FARIAS et al., 2007). As condições climáticas, a fertilidade do solo, época de semeadura, práticas culturais e cultivar utilizada, influenciam diretamente a evapotranspiração máxima da soja no decorrer de seu desenvolvimento. Contudo, os principais fatores para determinação do consumo de água estão relacionados com a demanda evaporativa atmosférica.

Souza et al. (2012) explicam as respostas fisiológicas e fenotípicas das plantas às condições ambientais variáveis, sobre condições adversas tendem a diminuir a área foliar para evitar maior perda de água através do processo de transpiração (redução da temperatura da planta). Tal processo caracteriza o destino da água absorvida pelas raízes que é perdida para a atmosfera através da abertura dos estômatos (mais abundantes na superfície abaxial das folhas), naturalmente se abrem durante o dia, regulando as trocas gasosas, pois é necessário a absorção de CO₂ para a fotossíntese (TAIZ e ZEIGER, 2013).

Em função da eficiência de fixação de carbono por unidade de água consumida, as plantas são divididas em mecanismos do tipo C₃, C₄ e CAM. A soja pertence ao grupo de plantas com mecanismo C₃, necessitando de 500 moléculas de água para fixa uma molécula de CO₂, enquanto esta relação é de 250 para plantas C₄ e de 50 para plantas CAM (TAIZ e ZEIGER, 2013). Tornando a soja mais sensível e menos eficiente em condições de déficit hídrico.

Relacionado ao consumo hídrico, Santos (2018) verificou que a cultura da soja sob déficit hídrico reduz a transpiração através da redução da condutância estomática. Bertolli et al. (2012) observaram valores nulos ou abaixo de zero de assimilação líquida de CO₂ em plantas de soja submetidas à indução de déficit hídrico lento, com capacidade de campo de 60%. Já Chavarria et al. (2015) estudando restrições hídricas em soja por período variando de 2 a 11 dias na fase vegetativa, constataram redução da assimilação de CO₂ conforme aumento do tempo de restrição hídrica. Enquanto Egli e Bruening (2004) observaram que déficit hídrico no período de enchimento de grãos, acelera a senescência de folhas, reduz o período da fase e o tamanho e rendimento de grãos.

As plantas também tentam resistir ao estresse hídrico através de mudanças em seu metabolismo, modificando o potencial osmótico de suas células, aumentando a força de sucção. O potencial de água quando reduzido de -0,1 para -0,4 Mpa devido estresse hídrico, já influencia na fotossíntese das plantas (KUDREV, 1994). De acordo com Cox e Joliff (1987), na soja, potencial hídrico nas folhas de -1,0 Mpa já representa estado crítico, culminando em fechamento dos estômatos e redução do processo fotossintético.

Neste contexto, na produção agrícola da soja, o principal produto final são os grãos, redução da área foliar faz com que a cultura intercepte menos radiação solar, reduzindo assim, sua produtividade potencial. Visando melhorar o desempenho agrônômico da soja, há o tratamento das sementes com os micronutrientes cobalto (Co) e molibdênio (Mo), com o intuito de promover maior desenvolvimento do sistema radicular e assim, expandir a zona efetiva das raízes, mitigando o impacto de déficit hídricos (SEDIYAMA et al., 2015), como também pode-se adotar fungos endofíticos como tecnologia a ser empregada na melhoria da produção de soja.

2.4. Fungos entomopatogênicos e relação endofítica com as plantas

O termo endofítico originalmente foi relatado por De Bary em 1866, o qual refere-se a qualquer microrganismo capaz de viver em tecidos de planta, engloba principalmente, fungos e bactérias. Dentre as diferentes definições encontradas, a amplamente aceita e utilizada é a descrita por Bacon e Write, em que endófitos são microrganismos que colonizam os tecidos internos das plantas sem lhes causar prejuízos imediatos (ESPOSITO; AZEVEDO, 2010; KHARWAR et al., 2011).

Quanto aos fungos, alguns colonizam insetos na forma de parasitismo, sendo classificados como entomopatogênicos. Os fungos entomopatogênicos atuam usando uma combinação de enzimas de degradação e pressão mecânica para romper a cutícula dos insetos e infectá-los, mas também podem ser ingeridos por via oral ou respiratória para efetivarem o parasitismo (BARELLI et al., 2016; BITTENCOURT; MASCARENHAS; FACCINI, 1999).

Os fungos entomopatogênicos são amplamente estudados e empregados no manejo de insetos-pragas através do controle biológico. Em vista disso, o uso destes fungos na agricultura aumentou significativamente nos últimos anos, impulsionado principalmente, por startups nacionais e multinacionais desenvolvedoras de biopesticidas.

Alguns dos principais fungos representantes desta classe são o *Metarhizium sp.*, *Beauveria bassiana* e *Isaria fumosorosea* (MEYLING; EILENBERG, 2007), com alto potencial entomopatogênico, os quais também tem demonstrado potencial de colonizarem endofiticamente várias espécies de plantas, gerando efeitos benéficos ao hospedeiro; promovendo crescimento, facilita a aquisição de nutrientes (ZHANG et al., 2006; HARTLEY; GANGE, 2009; ESCUDERO; LOPEZ-LLORCA, 2012; SUDHA et al., 2016; mitigação de estresses abióticos, como déficit hídrico, salinidade e altas concentrações de metais pesados no solo e herbicidas (ARAÚJO et al., 2010; GUNATILAKA, 2006; GUNDEL et al., 2010; KHAN et al., 2012); além dos efeitos contra fitopatógenos e herbivoria de insetos (JABER; ENKERLI, 2016; LOPEZ; SWORD, 2015; MARTÍNEZ-MEDINA et al., 2014; SILVA et al., 2006b).

O modo como os fungos entomopatogênicos infectam o tecido vegetal pode ser pela parte aérea das plantas, por intermédio de aberturas naturais (estômatos e hidatódios); ou feridas causadas por animais e insetos ou mecânica; outro meio é pelas raízes (SANTOS; VARAVALLO, 2011). Muitos são de ocorrência natural no solo ou em plantas, mas há também a aplicação de suspensão de conídios nas sementes e/ou solo (AZEVEDO et al., 2000).

Santos et al. (2013) ressaltam ainda que a interação planta-endofítico-ambiente define o modo e a persistência com que o fungo se estabelece na planta, variando de acordo com a planta hospedeira, espécie vegetal e isolado fúngico, sendo portanto, bastante complexa esta relação simbiótica. Nesta problemática, para Santos e Varavallo (2011) a interferência de fatores externos deve ser considerados principalmente, no implemento do uso de endófitos no meio agrícola, uma vez que para atestar os mesmos resultados obtidos em experimentos científicos, a quantidade de endofíticos inoculados nas plantas e o meio mais adequado de entrada dos microrganismos devem ser atendidos.

Tal interação planta e fungo entomopatogênico sucede pela produção pelos fungos de compostos bioativos como alcaloides, flavonoides, diterpenos e isoflavonoides que promove proteção a espécie vegetal, e obtenção de nutrientes e água pela rede hifas no solo, induzindo alterações fisiológicas e morfológicas benéficas no vegetal (FIRÁKOVÁ et al., 2007; JIA et al., 2016; RODRIGUEZ et al., 2009; WAQAS et al., 2012).

Muitos estudos com o uso de *B. bassiana* mostram resultados conflitantes quanto a sua aplicação endofítica, por exemplo, em um estudo realizado na Europa, o uso de *B. bassiana* promoveu crescimento de feijão-comum (JABER; ENKERLI, 2016), porém outros estudos não observaram nenhum ganho de crescimento em banana, feijão e milho (AKELLO et al., 2009). Possíveis causas

segundo Mckinnon et al. (2018), envolvem a redução da concentração com o passar do tempo da inoculação deste fungo na rizosfera ou ainda um efeito antagônico, onde as plantas somente sobre determinado estresse recorrem a se associarem com o fungo.

Em outro cenário, os fungos *Metarhizium* são mais comuns na rizosfera e apresentam alta persistência nos solos e vários estudos atestam sua capacidade de formar simbiose com as plantas (BARELLI et al., 2016; LIAO et al., 2014; ST. LEGER et al., 2011; TULLOCH, 1976; WANG; LEGER, 2007). Possuem genes que permitem a absorção de nutrientes exsudatos das raízes, proporcionando adaptabilidade do fungo ao ambiente (PAVA-RIPOLL et al., 2011; TIAGO; OLIVEIRA; LIMA, 2014).

Khan et al. (2012), em estudo sobre a inoculação de *M. anisopliae* constataram maior crescimento vegetativo, maior taxa de transpiração e fotossintética em plantas de soja em condições de estresse salino. O potencial da associação endofítica benéfica de *B. bassiana* também foi constatado por Vega (2008) em outras espécies vegetais como milho, batata, algodão e tomate.

Na soja foram poucos os estudos realizados sobre a colonização de entomopatógenos em relação aos ganhos da inoculação destes fungos sobre resistência a estresses abióticos, como o déficit hídrico, desenvolvendo associações com as raízes das plantas ocasionando benefícios ao seu crescimento, que podem vir a reduzir os riscos climáticos e assim, manter ou elevar a produção das lavouras de soja (VINHA, 2018).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização do local de experimento

O experimento foi conduzido durante os meses de outubro/2020 a fevereiro/2021 sob condição de ambiente protegido na área experimental do Departamento de Engenharia de Biosistemas (LEB) na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), situada no município de Piracicaba, no estado de São Paulo, com coordenadas geográficas 22° 43’ 30” de latitude Sul e 47° 38’ 00” de longitude Oeste, sendo a altitude local de aproximadamente 546 m.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo *Cfa* (DIAS et al., 2017). Sendo, portanto, clima subtropical úmido com clima oceânico, com ausência de estação seca com verão quente, temperaturas médias do ar anuais de 20,8 °C e a pluviosidade média anual em torno de 1.350 mm.

A estufa apresenta três vãos conjugados, com área total de aproximadamente 400 l70, pé-direito de 5,2 m, cobertura de filme plástico e laterais fechadas com tela tipo “sombrite” preta, com 50% de interceptação da radiação solar (Figura 2a). Os vãos conjugados apresentam um total de 132 vasos em concreto armado com dimensões de 1,04 m de comprimento, 1,24 m de largura e 0,76 m de altura, com volume de 1,0 l70, onde cada vaso foi subdividido em três partes iguais (Figura 2b), totalizando 396 vasos menores, ditas parcelas experimentais, com volume aproximado de 0,33 l50.

Ao lado da estufa principal há uma estufa secundária de apoio que abriga os quadros de comandos do sistema de irrigação, conjunto motobombas e dataloggers.



Figura 2. A – Estufa do Departamento de Biosistemas; B – Parcelas experimentais.

A cultura foi conduzida em solo da série “Sertãozinho”, que é um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura franco-arenosa. Para a análise química foram retiradas amostras em três profundidades, nas camadas de 0 - 0,20, 0,20 - 0,40 e 0,40 - 0,60 m (SANTOS et al., 2018), respectivamente. Os resultados, tanto de macronutrientes quanto de micronutrientes foram interpretados e a recomendação de adubação foi feita de acordo com Sediya et al. (2015). As características

químicas do solo são apresentadas na Tabela 2, conforme análises realizadas pelo Laboratório Agrotécnico Piracicaba^{*} de acordo com metodologias descritas em Rajj et al. (2001).

Tabela 2. Resultados das análises químicas do solo da área experimental, ESALQ/USP, Piracicaba, 2020.

Prof. cm	Análise química												
	pH CaCl ₂	P mg dm ⁻³	K	H+Al	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB	CTC	V	m	M.O g dm ⁻³	S mg dm ⁻³
0 - 20	5.1	44	1.0	31	1	33	10	44	75	59	2	11	100
20 - 40	5.3	35	0.6	25	0	30	7	38	63	60	0	11	25
40 - 60	5.3	39	0.5	25	0	28	5	34	59	57	0	11	49

Ca²⁺ = Cálcio; Mg²⁺ = Magnésio; K = Potássio; H+Al = Acidez potencial; Al³⁺ = Acidez trocável; P = Fósforo; SB = Soma de bases; CTC = Capacidade de troca catiônica a pH 7; V = Saturação por bases; m = Saturação por alumínio; MO = Matéria orgânica; S = enxofre.

3.2. Delineamento experimental

Para avaliação da soja quanto a ação mitigadora do estresse hídrico com o uso de fungos entomopatogênicos, foram adotados nove manejos de irrigação: I100VFR – 100% da CAD ao longo do ciclo completo; I70VFR – 70% da CAD ao longo do ciclo completo; I70V – 70% na fase vegetativa (Vn); I70F – 70% na fase de floração (R1-R3); I70R – 70% na fase de enchimento de grãos (R4-R6); I50VFR – 50% da CAD ao longo do ciclo completo; I50V – 50% na fase vegetativa; I50F – 50% na fase de floração e I50R – 50% na fase de enchimento de grãos (Tabela 3); sendo aplicados conforme o manejo da irrigação ao longo do cultivo, com a interação de três inoculantes denominados BJ (*Bradyrhizobium japonicum*, inoculante base), BB (*Beauveria bassiana* + inoculante base) e MA (*Metarhizium anisopliae* + inoculante base).

Tabela 3. Descrição da composição dos manejos de irrigação.

Manejos de irrigação						
Lâminas	Período	Estádio	Imposição de estresse hídrico (dias após semeadura)	Período de estresse	Legenda expandida	Legenda nominal
I100	VFR		-	-	I100V+I100F+I100R	I100VFR
I70	VFR	Ciclo completo	17 - 101	84	I70V+I70F+I70R	I70VFR
I50	VFR		17 - 101	84	I50V+I50F+I50R	I50VFR
I70	V	Estádio vegetativo	17 - 47	30	I70V+I100F+I100R	I70V
I50	V				I50V+I100F+I100R	I50V
I70	F	Início até fim da floração	48 - 63	15	I100V+I70F+I100R	I70F
I50	F				I100V+I50F+I100R	I50F
I70	R	Vagens com 2 a 4 cm até enchimento completo de grãos	64 - 101	37	I100V+I100F+I70R	I70R
I50	R				I100V+I100F+I50R	I50R

Os tratamentos corresponderam à interação dos níveis e fatores para a cultivar, em que foi considerado um delineamento inteiramente casualizado 9 x 3 em parcelas subdivididas, com 4 repetições, totalizando 108 parcelas experimentais.

O esquema de tratamentos com o fator manejo de irrigação dividido nas parcelas e os tipos de inoculantes subdividido nas subparcelas é apresentado no croqui a seguir:

	M1P0	M2P0	M2P1	M2P2	M2P3	M3P0	M3P1	M3P2	M3P3																																			
BO	M3P3 F2	M3P3 FT	M3P3 F1	M2P0 FT	M2P0 F1	M2P0 F2	BO																																					
BO	M2P3 F1	M2P3 FT	M2P3 F2	M1P0 F1	M1P0 FT	M1P0 F2	BO																																					
BO	M2P1 FT	M2P1 F2	M2P1 F1	M2P2 F2	M2P2 FT	M2P2 F1	M2P3 F1	M2P3 FT	M2P3 F2	M3P0 FT	M3P0 F1	M3P0 F2	M2P3 F1	BO	M2P3 FT	M2P3 F2	M3P1 FT	M3P1 F1	BO	M3P1 F2	M2P0 F1	M2P0 F2	M2P0 FT	M3P3 F1	M3P3 FT	BO																		
BO	M1P0 F2	M1P0 F1	M1P0 FT	M3P2 F2	M3P2 FT	M3P2 F1	M2P1 F2	M2P1 FT	M2P1 F1	M2P0 F1	M2P0 F2	M2P0 FT	M2P1 F1	M2P1 F2	M2P1 FT	M2P2 F1	M2P2 F2	M2P2 FT	M3P2 F1	M3P2 F2	M3P2 FT	M3P3 F1	M3P3 F2	M3P3 FT	M3P3 F1	M3P3 F2	M3P3 FT	BO																
BO	M2P2 F1	M2P2 FT	M2P2 F2	M3P1 F2	M3P1 FT	M3P1 F1	M3P0 F1	M3P0 F2	M3P0 FT	M3P2 F1	M3P2 F2	M3P2 FT	M1P0 F1	M1P0 F2	M1P0 FT	M3P1 F1	M3P1 F2	M3P1 FT	M3P3 F1	M3P3 F2	M3P3 FT	M3P3 F1	M3P3 F2	M3P3 FT	M3P3 F1	M3P3 F2	M3P3 FT	BO																
BO	BO	M2P1 F2	M2P1 FT	M2P1 F1	M2P2 FT	M2P2 F1	M2P2 F2	M3P0 F1	M3P0 F2	M3P0 FT	M3P0 F1	M3P0 F2	M3P0 FT	M3P0 F1	M3P0 F2	M1P0 F1	M1P0 F2	M1P0 FT	M1P0 F1	M1P0 F2	M1P0 FT	M2P0 F1	M2P0 F2	M2P0 FT	M2P0 F1	M2P0 F2	M2P0 FT	M3P2 F1	M3P2 F2	M3P2 FT	M3P2 F1	M3P2 F2	M3P2 FT	M3P1 F1	M3P1 F2	M3P1 FT	BO	BO						

Figura 3. Croqui do esquema experimental. BO – bordadura.

3.3. Condução do experimento

3.2.1 Preparo dos fungos entomopatogênicos e solução inoculante

Os fungos entomopatogênicos dos gêneros *Metarhizium* e *Beauveria*, seus isolados fúngicos foram fornecidos e cultivados no Laboratório de Controle Microbiano de Insetos do Departamento de Entomologia da ESALQ/USP.

Os isolados fúngicos foram cultivados em placas de Petri contendo meio de cultura Batata Dextrose Ágar (BDA, Difco, USA) e estavam incubados em câmara tipo BOD a 26 °C com 12 horas de fotofase.

Como primeira etapa do preparo da solução inoculante, foi realizada a fermentação sólida para aumento da quantidade de inóculo a ser utilizado na inoculação das sementes de soja. Inicialmente, as placas com os isolados fúngicos foram raspadas para retirada dos conídios e então, preparada uma suspensão ajustada com 1×10^8 conídios/20mL, com água estéril mais espalhante adesivo Tween a 0,01%, através de contagem em uma câmara de Neubauer com microscópio de luz.

Posteriormente, foram retirados 5 mL da suspensão de conídios para a inoculação de 100 g de arroz parpolizado pré-cozido, contido em um saco plástico de polipropileno de 35 cm de comprimento por 22 cm de largura, fechado com duas dobras e grampeado, onde previamente foi esterilizado em autoclave a 120 °C por 30 minutos e resfriado em condição ambiente.

Após a inoculação do arroz nos sacos plástico realizada em câmara de fluxo laminar, usando-se uma pipeta estéril de 10 mL, os sacos foram agitados para uma distribuição uniforme dos conídios na massa de grãos. Cada isolado foi inoculado em quatro sacos plásticos, em seguida os sacos foram acondicionados em estufa em câmara BOD durante 4 dias para germinação dos conídios e propagação dos micélios.

Decorrido os dias de germinação dos conídios, com auxílio de um funil e gaze, os grãos de arroz foram embebidos em água estéril com Tween e, então peneirados em frasco de vidro com tampa rosqueável (Marca Schott) e nova solução inoculante foi formada com concentração de conídios ajustada a 1×10^8 conídios/mL. Assim, foi formada 4 litros de solução inoculante para cada isolado fúngico.



Figura 4. Isolados fúngicos (1), propagação dos isolados em arroz pré-cozido (2) e formação da solução inoculante (3).

3.2.2 Plantio

Para a instalação do experimento utilizou-se a cultivar de soja convencional BRS 511 adquirida na empresa Sementes Marambaia, localizada na cidade Rio Verde/GO. Apresenta tipo de crescimento indeterminado, cor da flor roxa, cor da pubescência cinza e cor do hilo marrom-claro, resistente a ferrugem asiática, podridão da haste e radicular e mosaico comum na soja; própria para altitudes de até 700 m e de ciclo médio para o estado de São Paulo de 110 a 134 dias.

No preparo pré-semeadura ocorreu a inoculação das sementes com a bactéria do gênero *Bradyrhizobium* com inoculante turfoso, responsável pela formação de nódulos nas raízes de soja que permitem a obtenção do nitrogênio que a cultura necessita para seu desenvolvimento.

A semeadura manual foi realizada no dia 12 de outubro de 2020, onde foram abertos sulcos a 8 cm de profundidade para a adubação fosfatada de plantio com 12 g de FO_5 por linha de plantio (200 $kg\ ha^{-1}$ de FO_5 , Superfosfato Triplo) e a 3 cm para semeadura e então, em cada parcela experimental foram semeadas 20 sementes por metro linear a 5 cm de espaçamento, com o solo umedecido próximo a capacidade de campo. Nas parcelas relacionadas à inoculação dos fungos *Beauveria bassiana* e *Metharizhium anisopliae* foi realizada aplicação direta de 100 mL da suspensão de conídios sobre as sementes e solo das caixas, com auxílio de minipulverizador (Figura 5). Decorridos 20 dias, foi realizado o desbaste deixando apenas 15 plantas por metro linear.



Figura 5. Semeadura (1) e inoculação dos fungos nos sulcos de plantio (2).

3.2.3 Tratos culturais

Durante o experimento foi efetuado o controle fitossanitário com aplicações de bioinseticida (óleo de nim), como controle preventivo de pragas e doenças e, no estágio reprodutivo foi aplicado inseticida ENGEOPLENO devido infestação de mosca branca (*Bemisia tabaci*). As parcelas experimentais foram mantidas livres da presença de plantas daninhas, por meio de capinas manuais, em vista da competição com as plantas de soja.

A adubação de cobertura foi parcelada em 3 vezes com intervalos de 10 dias a partir do estágio V1 sendo aplicado 4,2 g/parcela de KCl (100 $kg\ ha^{-1}$ de KCl) diluído em água suficiente para aplicar. Já as aplicações foliares contou com o uso de produtos do portfólio nutricional de plantas da empresa Compass Minerals®, conforme planejamento descrito na tabela 4; objetivando que as plantas não fossem submetidas a qualquer restrição de nutrientes.

Tabela 4. Planejamento de adubações foliares ao longo da condução do experimento.

Épocas de aplicação		
Vegetativo	Florescimento	Enchimento de grãos
Tônus (0,3 kg ha ⁻¹)	Profol produtividade (1,5 kg ha ⁻¹)	Translok (2 kg ha ⁻¹)
Kellus inox (0,5 kg ha ⁻¹)	Concorde (1 L ha ⁻¹)	Concorde (1 L ha ⁻¹)
Energy (2 kg ha ⁻¹)	Kellus imune (0,5 kg ha ⁻¹)	Helper neutrum (0,05 %)
Helper Dessek (0,05 %)	Triplus anuais (0,3 L ha ⁻¹) Helper neutrum (0,05 %)	

3.2.4 Sistema e manejo da irrigação

A irrigação foi do tipo localizada por gotejamento, na qual a fonte de água foi canalizada da rede hidráulica da Esalq com auxílio de conjunto motobomba 1,0 cv e pressão de 20,0 mca, armazenada em reservatório com capacidade de armazenamento de 5 I50, próximo à estufa secundária. O sistema de gotejamento conta com tubos gotejadores com emissores autocompensados espaçados em 0,15 m, totalizando seis emissores por parcela, cada gotejador possui vazão de 0,6 L h⁻¹, para formação de faixa molhada contínua, que proporciona melhor aproveitamento da água pelo sistema radicular da soja.

Os tubos gotejadores foram fixados no centro de cada parcela com estacas plásticas para manter os emissores voltados para cima, evitando a deposição de partículas sólidas que possam causar entupimento dos emissores. Cada parcela experimental foi irrigada individualmente e o abastecimento dos tubos foi realizada por meio de microtubos que conduzem a água ao sistema, e seu controle se dar pela abertura e fechamento de micro registros localizados no painel de irrigação na casa de vegetação secundária.

Previamente à aplicação dos tratamentos, as parcelas experimentais foram irrigadas de acordo com a demanda evaporativa diária por computo da evapotranspiração de referência (método Penman-Monteith) até o 15º dia após plantio, para então aplicar os tratamentos.

O manejo da irrigação foi realizado por meio do monitoramento da tensão de água retida nas partículas do solo através da aferição das leituras de tensão, de baterias de tensiômetros de punção instaladas nas profundidades de 20, 40 e 60 cm em todas as parcelas com tratamento de reposição hídrica de 100% da CAD do solo, irrigando sempre que a tensão limite de -20 kPa era atingida.

A partir das leituras de tensão, convertidas em potencial mátrico pela Equação 1, foi estimada a umidade do solo por meio do modelo proposto por Van Genuchten (1980) (Equação 2) para os tratamentos de 100% da CAD. Para os demais, foi calculada a fração proporcional a partir do tratamento de 100% (I100), com 70 e 50% da CAD para I70 e I50, respectivamente. Já os tempos de irrigação foram calculados considerando o volume de água a ser aplicado pela vazão do tubogotejador.

$$\Psi_{ma} = I_t - h_c \quad (1)$$

Em que:

Ψ_{ma} – potencial mátrico do solo (kPa);

I_t – tensão de água no solo (leitura do tensiômetro) (kPa);

h_c – pressão equivalente à altura da coluna d'água no tensiômetro (kPa);

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha |\Psi_m|)^n]^{-m} \quad (2)$$

Em que:

θ (Ψ_m) - umidade volumétrica em função do potencial mátrico, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

θ_r - umidade volumétrica residual do solo, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

θ_s - umidade volumétrica do solo saturado, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

m e n - parâmetros de regressão da equação, adimensionais;

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

Ψ_m - potencial mátrico, em kPa.

3.2.5 Mensuração de dados meteorológicos

A coleta e monitoramento de dados meteorológicos foi proveniente da estação meteorológica (Campbell Sci.) situada no interior da estufa. Os dados acompanhados durante o experimento foram: densidade de fluxo (W m^{-2}), radiação solar global (Rg), temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (%) e pressão atmosférica (kPa). Os valores médios obtidos em intervalos de coleta de 15 minutos são armazenados em datalogger modelo CR1000 – Campbell Sci, os quais são filtrados para as devidas inferências.

3.4. Variáveis analisadas

3.4.1 Rendimento de grãos e componentes de rendimento e crescimento

As avaliações relacionadas ao desempenho agrônomo foram realizadas após a colheita manual ocorrida no dia 1° de fevereiro de 2021, quando 95% das vagens apresentavam coloração típica de vagem madura (FEHR et al., 1971), resultando em 113 dias de ciclo de cultivo da soja. Assim, as variáveis analisadas relacionadas à produção das plantas, foram compostas por:

- i) Altura de plantas (A, cm) – considerada altura máxima, aferida com auxílio de fita métrica;
- ii) Diâmetro do caule (D, mm) – aferida com auxílio de paquímetro;
- iii) Altura de inserção do primeiro legume (AIPL, cm) – altura entre o solo e a inserção do primeiro legume, indica a qualidade da colheita mecanizada;
- iv) Número de nós por planta (NNP) – contagem em todo o caule;
- v) Número total de vagens por planta (NVP) – por ocasião da colheita;
- vi) Massa seca de caule, folha e ramificações (MCFR) – obtida de duas plantas da parcela no estádio R7, em que as plantas ainda apresentam aspecto verde e finalizaram seu crescimento. Os referidos órgãos foram separados e acondicionados em estufa de ventilação forçada de ar a 60 °C até atingirem massa constante, com posterior pesagem em balança de precisão para cálculo dos percentuais de massa seca total da parte área;
- vii) Massa de cem grãos (MCG, g) – após debulhagem e limpeza com auxílio de balança analítica com precisão de 0,001 kg, por ocasião da colheita;
- viii) Massa seca de grãos (MSG, g) – por planta, por ocasião da colheita;
- ix) Produtividade de grãos (kg ha^{-1}) – considerando a densidade populacional da cultivar convencional pela massa de grãos por planta;
- x) Área foliar (AF, cl70) – para estimativa da área foliar foi utilizado o integrador de área foliar de bancada modelo LI-3100 Area Meter (LICOR®), resolução de 1 ml70 . Foram selecionadas duas plantas representativas de cada parcela experimental no estádio R7, em que todas as folhas da planta foram destacadas e digitalizadas;
- xi) Índice de área foliar (cl70 cm^{-2}) – foi determinado pela relação AFP/AOP , em que AFP = área foliar por planta (cl70) e AOP = área ocupada pela planta (cm^{-2}).

3.4.2 Variáveis fisiológicas

As trocas gasosas das plantas foram avaliadas para registro da taxa fotossintética (A , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiração (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e da relação entre a concentração interna e externa de CO_2 (C_i/C_a). A eficiência intrínseca do uso da água (iEUA) foi

obtida pela divisão entre a taxa fotossintética líquida e a condutância estomática (A/g_s). Estas avaliações foram realizadas utilizando um analisador de gases do infravermelho (IRGA), equipado com um fluorômetro, modelo LI-6400 XT (Licor, Nebraska, Estados Unidos).

O equipamento foi ajustado para fonte de luz constante de $1.200 \mu\text{mol}$ de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e concentração de CO_2 no ar fixada em $400 \pm 5 \mu\text{mol}^{-1}$ durante as medições. As medições das trocas gasosas foram realizadas nos 46 DAS e 60 DAS, em dias de céu límpido entre 09:00 e 12:00 h, na última folha totalmente expandida do ápice das plantas. Deste modo, as variáveis fisiológicas aferidas foram:

- i) Taxa de transpiração (E) em $\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$;
- ii) Taxa fotossintética (A) em $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$;
- iii) Condutância estomática (g_s) em $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$;
- iv) Eficiência intrínseca do uso da água (iEUA) em $\mu\text{mol CO}_2 / \text{mmol de H}_2\text{O}$.

3.4.3 Potencial hídrico foliar

Foi avaliado o potencial hídrico foliar da soja por intermédio da câmara de pressão de Scholander (Modelo 3005, Soil Moisture Equipment Corporation) nos mesmos períodos descritos para análise das trocas gasosas. Sendo realizado a partir das 2h da manhã até antes do amanhecer, mediante a coleta da última folha completamente expandida de cada parcela experimental e acondicionada em caixa resfriada para posterior análise do potencial hídrico dos tratamentos.

3.4.4 Eficiência do uso da água

Conforme proposto por Doorenbos e Kassan (1994), foi calculada em função da produção, de acordo com a equação a seguir.

$$EUA = \frac{P}{CA} \quad (3)$$

Em que:

EUA – eficiência do uso da água, kg m^{-3} ;

P – produção de grãos, kg ha^{-1} ;

CA – volume de água aplicado, $\text{m}^{-3} \text{ha}^{-1}$.

3.4.5 Índice de colheita

O índice de colheita (IC) foi calculado pela relação entre a produção de grãos secos e o peso seco total da biomassa aérea, como proposto por Donald e Hamblin (1976) pela equação a seguir.

$$IC = \frac{\textit{Produção de grãos secos (Kg)}}{\textit{Peso total da matéria seca da parte aérea (Kg)}} \quad (4)$$

3.5. Análise estatística

ANOVA de duas vias foi usada para avaliar simultaneamente o efeito dos manejos de irrigação e tipos de inoculações, como variáveis independentes, sobre os parâmetros de rendimento de grãos, componentes de rendimento, eficiência do uso da água e índice de colheita. Além disso, as diferenças de médias foram comparadas pelo teste LSD a 5% de probabilidade. Já ANOVA repetida de três vias foi usada nas variáveis fisiológicas para avaliar o efeito dos manejos de irrigação e inoculantes com a interação da época de mensuração destas variáveis, sendo as médias dos dados fisiológicos submetidas a teste POST-HOC de comparações em pares para identificar a interação dos dados no tempo. As correlações entre todas as variáveis analisadas foram realizadas por meio de matriz de Correlação de Pearson. Destaca-se que todas as análises estatísticas foram realizadas com o software R (<http://www.r-project.org>) e os resultados são apresentados na próxima seção deste trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Parâmetros meteorológicos durante o experimento

Utilizou-se os dados meteorológicos registrados pela estação meteorológica presente dentro do ambiente protegido. As temperaturas do ar máxima, mínima e média ao longo do experimento são apresentadas na Figura 6.

Ao longo do experimento ocorreram duas manifestações de friagem, frentes frias, com duração de três a cinco dias, sucederam-se no dia 17/10/2020 (17,15 °C) e no dia 20/10/2020 (22,10 °C), no decorrer do estágio vegetativo da cultura. Segundo Bergamaschi e Matzenauer (2014), a temperatura do ar é fator determinante na fenologia das plantas, interferindo nas atividades metabólicas da soja e por consequência, na duração de seu ciclo cultural.

Além da forte influência do fotoperíodo na duração dos estádios fenológicos na soja, a temperatura também em conjunto, tem grande importância ao atuar modelando diretamente a translocação de carboidratos da folha para diversos órgãos das plantas, à baixas temperaturas a falta de translocação afeta negativamente a taxa fotossintética (ROMERO-ROMERO et al., 2018).

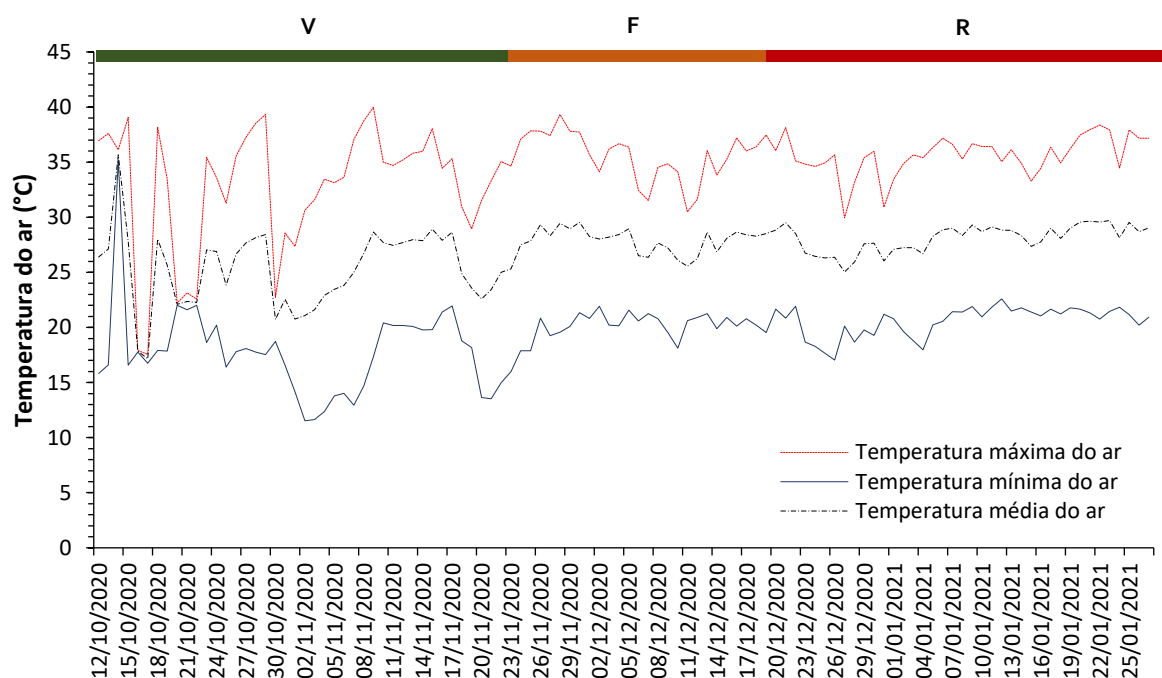


Figura 6. Registros diários da temperatura máxima, mínima e média do ar coletadas pela estação meteorológica durante o ciclo da soja irrigada por gotejamento na região de Piracicaba, São Paulo, 2020/21. V – vegetativo, F – florescimento e R – enchimento e maturação de grãos.

As médias mensais de umidade relativa do ar (UR), radiação solar (RS) e evapotranspiração de referência (ET_o, Método Penman-Monteith), além das temperaturas do ar podem ser observadas na tabela 5. A média geral durante o experimento para temperatura máxima e mínima foi de 35,5 °C e

18,7 °C, respectivamente. Média para radiação solar de 10,9 MJ m⁻² dia⁻¹, umidade relativa de 67,9 % e ETo com 3,9 mm dia⁻¹.

Tabela 5. Registros mensais dos dados meteorológicos na estufa ao longo do período experimental, durante o ciclo da soja irrigada por gotejamento na região de Piracicaba, São Paulo, 2020/21.

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

4.2. Manejo da irrigação e consumo hídrico

Os registros médios diários da tensão de água no solo obtidas pela bateria de tensiômetros instalados nas profundidades de 0 – 20 cm, 20 – 40 cm e 40 – 60 cm são observados na Figura 7.

A frequência do fornecimento de água mediante o acionamento do sistema de irrigação foi alterada conforme o desenvolvimento da cultura da soja. Nos estádios iniciais (15 a 48 DAS), a reposição hídrica foi menos frequente devido as plantas disporem de sistema radicular de menor abrangência e menor quantidade de folhas, culminando em baixa transpiração.

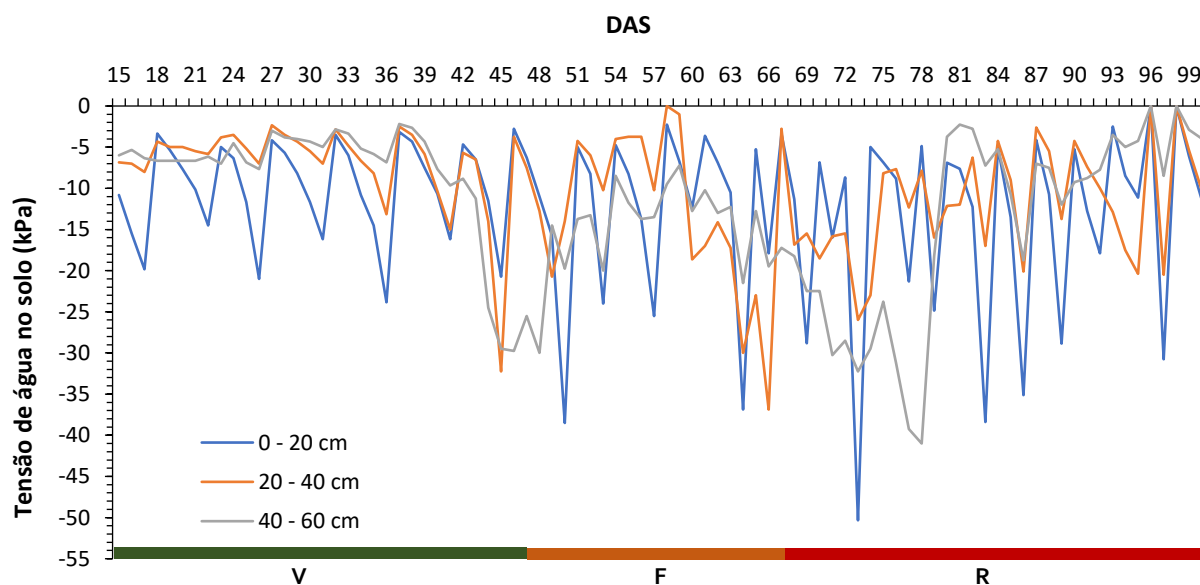


Figura 7. Potencial de água no solo para o tratamento referencial de 100% da CAD (I100VFR) ao longo do ciclo cultural para três profundidades aferidas. V – vegetativo, F – florescimento e R – enchimento e maturação de grãos.

A irrigação acumulada obtida para o tratamento com plena irrigação (I100VFR) foi de 400 mm, enquanto para os demais tratamentos, aplicadas as devidas reduções (70 e 50% da CAD), foi de 293 mm (I70VFR), 380 mm (I70V), 386 mm (I70F), 331 mm (I70R), 223 mm (I50VFR), 367 mm (I50V), 365 mm (I50F) e 286 mm (I50R), com reduções percentuais de 27, 5, 3, 17, 44, 8, 9 e 28% respectivamente.

4.3. Efeito da irrigação sob déficit nos componentes de rendimento, rendimento de grãos, eficiência do uso da água e índice de colheita

A ANOVA de duas vias revelou que houve diferença significativa na interação entre os manejos de irrigação e os inoculantes sobre produtividade (PP), eficiência do uso da água (EUA) e índice de colheita (IC) (Tabela 6). Em adição, considerando a fonte de variação manejos (M), foi observada interação significativa para diâmetro de caule (D), massa de cem grãos (MCG), altura de plantas (A) e número de nós por planta (NN), enquanto as variáveis número de vagens (NV) e índice de área foliar máximo ($IAF_{máx}$) foram significativos para as fontes de variação M e M x F. Por fim, a altura de inserção do primeiro legume (AIPL) não apresentou diferença significativa para nenhuma fonte de variação.

Inicialmente, foi realizado uma filtragem dos dados, das quatro repetições, três foram consideradas com base nos valores de produtividade das parcelas e atentando-se à distribuição dos dados para melhoria do coeficiente de variação experimental. Assim, quanto a precisão experimental estimada pelo CV, de acordo com Pimentel-Gomes e Garcia (2002) é classificado como baixa ($CV \leq 10,00\%$), média ($10,00\% < CV \leq 20,00\%$), alta ($20,00\% < CV \leq 30,00\%$) e muito alta ($CV > 30,00\%$); este diferiu entre as variáveis, sendo que o maior valor observado foi para o IC de 26,25%. Ao passo que, para a maioria das variáveis, os valores do CV foram inferiores a 20%, indicando bom nível de precisão experimental. Na tabela 6, o CV1 está atribuído ao erro experimental dentro da parcela, a variação entre os manejos de irrigação e, o CV2 na subparcela, portanto, considera a variação entre os inoculantes.

Tabela 6. Análise de variância (valor F) correspondente ao rendimento de grãos e componentes de rendimento em função da interação de manejos de irrigação e inoculação, Piracicaba, SP, 2020.

Fonte de variação	GL	AIPL	D	MCG	A	NN	NV	IAF _{máx}	PP	EUA	IC
Manejo (M)	8	0,63 ^{ns}	3,39 ^{**}	3,08 [*]	6,49 ^{**}	3,30 ^{**}	19,10 ^{**}	8,20 ^{**}	5,69 ^{**}	4,80 ^{**}	3,28 [*]
Inoculante (F)	2	1,03 ^{ns}	1,20 ^{ns}	1,70 ^{ns}	0,73 ^{ns}	0,97 ^{ns}	0,66 ^{ns}	3,12 ^{ns}	7,33 ^{**}	8,47 ^{**}	6,38 ^{**}
M x F	16	0,58 ^{ns}	1,37 ^{ns}	0,96 ^{ns}	0,90 ^{ns}	0,98 ^{ns}	3,78 ^{**}	3,85 ^{**}	2,93 ^{**}	3,59 ^{**}	3,02 ^{**}
CV1 (%)		17,40	10,97	12,83	12,34	10,33	13,81	17,37	18,88	21,36	26,25
CV2 (%)		17,90	7,35	12,77	7,92	8,29	10,07	15,48	20,31	17,97	21,76

Em que: GL – grau de liberdade; AIPL – altura de inserção do primeiro legume; D - diâmetro de caule; MCG – massa de 100 grãos; MGP – massa de grãos por planta; A – altura máxima de plantas; NN – número de nós por planta; NV – número total de vagens por planta; IAF_{máx} – índice de área foliar máximo; PP – produtividade; EUA – eficiência do uso da água; IC – índice de colheita; * significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; ** significativo pelo teste F a 1% de probabilidade; ns - não significativo.

A produtividade média (I100VFR) não divergiu entre os inoculantes, variando entre 4.742 kg ha⁻¹ e 3,625 kg ha⁻¹, sendo o inoculante BJ superior aos demais em valor absoluto (Figura 8). Os inoculantes proporcionaram menor rendimento de grãos por hectare para I70VFR e I50VFR, pois os níveis de irrigação foram reduzidos a 70 e 50%, respectivamente, ao longo do ciclo. Considerando os manejos de irrigação para o inoculante BJ, não houve diferença estatística entre I100VFR e I50R, em que foram iguais e superiores aos demais, visto que os níveis de irrigação foram reduzidos nas fases de floração e enchimento de grãos. O estresse moderado (I70) diminuiu significativamente a PP em todos os períodos, com reduções variando de 14 a 20%, enquanto o estresse severo (I50) diminuiu a PP, exceto na fase de maturação de grãos (I50R), com reduções variando entre 40% e 55% (Figura 8). Este cenário contrastou com os resultados obtidos dos manejos para o inoculante BB, pois o estresse moderado no estágio de florescimento (I70F) e de maturação de grãos (I70R) apresentaram PP superior aos demais tratamentos e ainda, diminuiu significativamente a produção de grãos para I100VFR em 17,21% (Figura 8). Situação similar foi observada entre os manejos inoculados com MA, onde I70F foi estatisticamente superior aos demais e o tratamento com irrigação plena teve redução no rendimento de grãos de 7% (Figura 8).

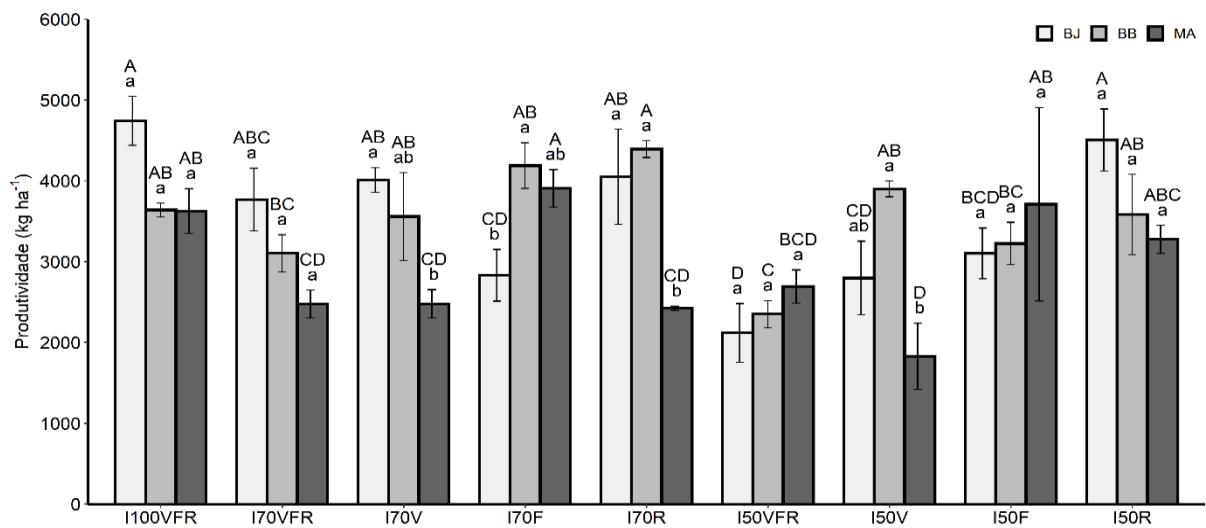


Figura 8. Rendimento de grãos da soja em kg ha^{-1} em função da interação de manejos de irrigação e inoculantes. I100VFR – 100% da CAD ao longo do ciclo completo; I70VFR – 70% da CAD ao longo do ciclo completo; I70V – 70% na fase vegetativa; I70F – 70% na fase de floração; I70R – 70% na fase de enchimento de grãos; I50VFR – 50% da CAD ao longo do ciclo completo; I50V – 50% na fase vegetativa; I50F – 50% na fase de floração; I50R – 50% na fase de enchimento de grãos. Inoculantes: BJ – *Bradyrhizobium japonicum*; BB – *Beauveria bassiana* + BJ; MA – *Metarhizium anisopliae* + BJ. Médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem pelo teste LSD a nível de 5% de significância para cada inoculante nos diferentes manejos de irrigação. Médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem pelo teste LSD a nível de 5% de significância para diferentes inoculantes dentro de cada manejo de irrigação.

Maior produtividade média foi obtida no I100VFR de 4.742 kg ha^{-1} para BJ, no entanto não diferiu estatisticamente da produtividade de grãos de 4.400 em I70R para BB. No manejo I70F, os fungos foram superiores a inoculação base, com 4.200 kg ha^{-1} , 3.900 kg ha^{-1} e 2.800 kg ha^{-1} para BB, MA e BJ, respectivamente.

O déficit severo apenas em subperíodos foi prejudicial em todas as formas de ocorrência. No entanto, em menor intensidade quando ocorrido na fase de maturação de grãos (R), o mesmo ocorreu com o déficit moderado que causou menor redução ou elevou a produtividade quando sua ocorrência se deu nos estádios finais.

Assim, a inoculação com os fungos entomopatogênicos nos tratamentos a plena irrigação podem potencialmente afetar negativamente o rendimento de massa de grãos por planta, como visto na figura 8, mas podem auxiliar as plantas quando ocorrem condições adversas, neste caso, o déficit hídrico.

Os valores médios de componentes de rendimento podem ser observados na tabela 7AB. Os componentes, número de nós por planta (NN), diâmetro de caule por planta (D), massa de cem grãos (MCG) e altura da planta (AP) pela ANOVA, apresentaram diferença significativa apenas entre manejos de irrigação, sendo estatisticamente iguais para inoculantes (Tabela 6). Assim, para NN o manejo I50V proporcionou maior média que os demais, com 16,5 nós e, houve redução percentual de 20% em relação a menor média (I50VFR) (Tabela 7A). Para o componente diâmetro do caule (D), os manejos I100VFR, I70V e I50V, foram estatisticamente iguais e superiores aos demais, em adição, os manejos

sob estresse moderado e grave na floração e enchimento de grãos (I70F, I70F, I50F e I50R) apresentaram menores reduções de D, variando de 4 a 7%; já para estresse moderado e grave ao longo do ciclo (I70VFR e I50VFR), esta redução foi mais acentuada, de 13 e 20%, respectivamente (Tabela 7A).

O componente número total de vagens por planta pela ANOVA apresentou diferença significativa para manejos de irrigação e interação com inoculantes (Tabela 6). Considerando-se os manejos de irrigação para o inoculante BJ, I50V foi superior aos demais manejos. O estresse moderado (I70) diminuiu significativamente o NV em todos os períodos, com reduções variando de 14 a 36%, enquanto o estresse severo (I50) diminuiu o NV, exceto no estágio vegetativo (I50V), com reduções variando entre 17% e 46% (Tabela 7A). Mesmo cenário foi observado entre manejos para o inoculante BB, I50V apresentou maior média (53 vagens planta⁻¹) (Tabela 7A). Situação divergente foi observada entre os manejos inoculados com MA, onde I50V, I70V e I100VFR foram estatisticamente iguais e superiores aos demais (Tabela 7A).

Tabela 7A. Valores médios de componentes de rendimento e crescimento em função da interação de manejos de irrigação e inoculação. I100VFR – 100% da CAD ao longo do ciclo completo; I70VFR – 70% da CAD ao longo do ciclo completo; I70V – 70% na fase vegetativa; I70F – 70% na fase de floração; I70R – 70% na fase de enchimento de grãos; I50VFR – 50% da CAD ao longo do ciclo completo; I50V – 50% na fase vegetativa; I50F – 50% na fase de floração; I50R – 50% na fase de enchimento de grãos. Inoculantes: BJ – *Bradyrhizobium japonicum*; MA – *Beauveria bassiana*; MA – *Metarhizium anisopliae*.

Componentes de rendimento e crescimento	Inoculantes							
	BJ		BB		MA		Média	
Número de nós por planta	I100VFR	14,8	I100VFR	14,2	I100VFR	16,6	I100VFR	15,20 ABC
	I70VFR	14,44	I70VFR	15,89	I70VFR	14,33	I70VFR	14,89 BC
	I70V	15,1	I70V	15,7	I70V	16,4	I70V	15,73 AB
	I70F	15,11	I70F	15,22	I70F	14,78	I70F	15,04 ABC
	I70R	14,8	I70R	16,3	I70R	15,33	I70R	15,48 ABC
	I50VFR	12,8	I50VFR	13,8	I50VFR	12,78	I50VFR	13,12 D
	I50V	16,2	I50V	16,6	I50V	16,7	I50V	16,50 A
	I50F	13,6	I50F	15	I50F	14,33	I50F	14,31 CD
	I50R	15	I50R	14,2	I50R	14,56	I50R	14,59 CD
	Média	14,65 a	Média	15,21 a	Média	15,09 a		
Diâmetro de caule por planta	I100VFR	4,31	I100VFR	4,13	I100VFR	4,27	I100VFR	4,24 A
	I70VFR	3,56	I70VFR	4,09	I70VFR	3,46	I70VFR	3,70 BC
	I70V	4,15	I70V	4,24	I70V	4,32	I70V	4,24 A
	I70F	3,67	I70F	4,32	I70F	4,08	I70F	4,02 AB
	I70R	4,07	I70R	4,16	I70R	3,91	I70R	4,05 AB
	I50VFR	3,39	I50VFR	3,39	I50VFR	3,47	I50VFR	3,42 C
	I50V	4,1	I50V	4,19	I50V	4,32	I50V	4,20 A
	I50F	3,71	I50F	4,11	I50F	4,38	I50F	4,07 AB
	I50R	4,1	I50R	3,97	I50R	3,97	I50R	4,01 AB
	Média	3,90 a	Média	4,07 a	Média	4,02 a		
Número de vagens por planta	I100VFR	47,33 ABa	I100VFR	50,52 ABa	I100VFR	50,17 Aa	50,17	
	I70VFR	39,05 CDa	I70VFR	38,44 CDa	I70VFR	33,44 Ca	40,83	
	I70V	45,00 ABCa	I70V	50,89 ABa	I70V	52,25 Aa	32,56	
	I70F	33,44 DEb	I70F	44,72 BCa	I70F	46,50 ABa	52,58	
	I70R	42,39 BCa	I70R	44,33 BCa	I70R	31,33 Cb	25,83	
	I50VFR	28,22 Ea	I50VFR	23,89 Ea	I50VFR	25,83 Ca	44,72	
	I50V	52,58 Aa	I50V	52,58 Aa	I50V	53,91 Aa	42,39	
	I50F	37,33 CDa	I50F	40,83 Ca	I50F	42,17 Ba	50,89	
	I50R	43,44 BCa	I50R	32,39 Db	I50R	32,56 Cb	38,44	
	Média	40,98	Média	42,07	Média	40,91		

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem pelo teste LSD a nível de 5% de significância para manejos de irrigação. Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem pelo teste LSD a nível de 5% de significância para inoculantes.

Sob estresse grave na fase de enchimento de grãos, a MCG apresentou maior média (13,19 g) em relação aos demais manejos (Tabela 7B). Em contraste com os componentes anteriores, a maior média para altura de plantas foi observada no manejo I50V (113,99 cm) e a menor média no manejo I50VFR (83,28 cm), representando uma redução percentual de 27% (Tabela 7B).

Por fim, a altura de inserção do primeiro legume não apresentou diferença significativa para nenhuma fonte de variação, apresentando valores entre 16 e 24 cm (Tabela 7B).

Tabela 7B. Valores médios de componentes de rendimento e crescimento em função da interação de manejos de irrigação e inoculação. I100VFR – 100% da CAD ao longo do ciclo completo; I70VFR – 70% da CAD ao longo do ciclo completo; I70V – 70% na fase vegetativa; I70F – 70% na fase de floração; I70R – 70% na fase de enchimento de grãos; I50VFR – 50% da CAD ao longo do ciclo completo; I50V – 50% na fase vegetativa; I50F – 50% na fase de floração; I50R – 50% na fase de enchimento de grãos. Inoculantes: BJ – *Bradyrhizobium japonicum*; MA – *Beauveria bassiana*; MA – *Metarhizium anisopliae*.

Componentes de rendimento e crescimento	Inoculantes							
	BJ		BB		MA		Média	
Massa de 100 grãos	I100VFR	10,93	I100VFR	10,50	I100VFR	12,45	I100VFR	11,29 BC
	I70VFR	12,35	I70VFR	11,56	I70VFR	10,86	I70VFR	11,59 BC
	I70V	11,07	I70V	9,51	I70V	11,17	I70V	10,58 BC
	I70F	12,18	I70F	11,86	I70F	12,79	I70F	12,28 AB
	I70R	10,56	I70R	12,90	I70R	11,02	I70R	11,49 BC
	I50VFR	10,55	I50VFR	10,77	I50VFR	11,72	I50VFR	11,01 BC
	I50V	9,75	I50V	9,57	I50V	9,97	I50V	9,76 C
	I50F	12,49	I50F	10,73	I50F	12,47	I50F	11,90 B
	I50R	12,27	I50R	13,91	I50R	13,38	I50R	13,19 A
	Média	11,35 a	Média	11,26 a	Média	11,76 a		
Altura por planta	I100VFR	102,50	I100VFR	97,99	I100VFR	116,02	I100VFR	105,50 ABC
	I70VFR	92,01	I70VFR	93,51	I70VFR	89,87	I70VFR	91,80 DE
	I70V	109,50	I70V	116,41	I70V	110,10	I70V	112,00 AB
	I70F	94,78	I70F	99,60	I70F	99,23	I70F	97,87 BCD
	I70R	114,80	I70R	109,48	I70R	112,99	I70R	112,42 ABC
	I50VFR	80,37	I50VFR	84,63	I50VFR	87,87	I50VFR	84,29 E
	I50V	111,05	I50V	109,95	I50V	111,55	I50V	110,85 A
	I50F	89,06	I50F	91,36	I50F	99,57	I50F	93,33 DE
	I50R	102,89	I50R	94,76	I50R	97,67	I50R	98,44 CD
	Média	99,66 a	Média	99,74 a	Média	102,76 a		
Altura de inserção do primeiro legume	I100VFR	20,80	I100VFR	20,46	I100VFR	19,73	I100VFR	20,33 A
	I70VFR	21,44	I70VFR	21,40	I70VFR	19,47	I70VFR	20,77 A
	I70V	20,05	I70V	20,14	I70V	19,63	I70V	19,94 A
	I70F	16,68	I70F	24,31	I70F	20,20	I70F	20,40 A
	I70R	22,07	I70R	23,02	I70R	21,30	I70R	22,13 A
	I50VFR	18,15	I50VFR	20,24	I50VFR	20,62	I50VFR	19,67 A
	I50V	21,56	I50V	22,13	I50V	18,81	I50V	20,83 A
	I50F	23,58	I50F	22,63	I50F	22,41	I50F	22,87 A
	I50R	22,74	I50R	20,66	I50R	24,47	I50R	22,62 A
	Média	20,79 a	Média	21,67 a	Média	20,74 a		

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem pelo teste LSD a nível de 5% de significância para manejos de irrigação. Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem pelo teste LSD a nível de 5% de significância para inoculantes.

O $IAF_{máx}$ diferiu entre manejos de irrigação e inoculantes, variando de 7,90 a 3,98 (Tabela 8). Os inoculantes apresentaram menor $IAF_{máx}$ para I70VFR (exceto MA) e I50VFR, devido a redução dos níveis de irrigação em 70 e 50%, respectivamente, ao longo do ciclo. Considerando-se os manejos de irrigação para o inoculante BJ, maior $IAF_{máx}$ foi obtido para I50V (8,70), pela redução dos níveis de irrigação nas fases de floração e enchimento de grãos, o $IAF_{máx}$ diminuiu entre 9 e 50% (Tabela 8). Este cenário contrastou com os resultados obtidos dos manejos para o inoculante BB, pois o estresse severo no estágio de florescimento (I50F) e vegetativo (I50V) apresentaram IAF superior aos demais

tratamentos e ainda, diminuiu significativamente para I100VFR em 24% (Tabela 8). Já entre os manejos inoculados com MA, I50V, I70R e I70VFR foram estatisticamente iguais e superiores aos demais e o tratamento com irrigação plena deve redução de IAF de 35% (Tabela 8).

Tabela 8. Valores médios de índice de área foliar máximo em função da interação de manejos de irrigação e inoculantes. I100VFR – 100% da CAD ao longo do ciclo completo; I70VFR – 70% da CAD ao longo do ciclo completo; I70V – 70% na fase vegetativa; I70F – 70% na fase de floração; I70R – 70% na fase de enchimento de grãos; I50VFR – 50% da CAD ao longo do ciclo completo; I50V – 50% na fase vegetativa; I50F – 50% na fase de floração; I50R – 50% na fase de enchimento de grãos. Inoculantes: BJ – *Bradyrhizobium japonicum*; MA – *Beauveria bassiana*; MA – *Metarhizium anisopliae*.

Componente de crescimento	Inoculantes						
	BJ		BB		MA	Média	
Índice de área foliar máximo	I100VFR	7,90 Aba	I100VFR	5,93 BCDb	I100VFR	4,55 BCb	5,93
	I70VFR	4,59 EFb	I70VFR	4,87 DEb	I70VFR	6,56 Aa	5,01
	I70V	6,48 BCDA	I70V	6,43 ABCa	I70V	5,92 ABa	4,88
	I70F	5,99 CDEa	I70F	5,41 CDEa	I70F	4,98 BCa	7,25
	I70R	6,76 BCa	I70R	5,70 CDa	I70R	6,83 Aa	4,33
	I50VFR	4,33 Fa	I50VFR	3,98 Ea	I50VFR	4,55 BCa	5,41
	I50V	8,70 Aa	I50V	7,25 ABa	I50V	7,07 Aa	6,76
	I50F	5,01 DEFb	I50F	7,84 Aa	I50F	4,36 Cb	6,43
	I50R	5,41 CDEFa	I50R	4,79 DEa	I50R	4,88 BCa	4,87
	Média	6,13	Média	5,80	Média	5,52	

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem pelo teste LSD a nível de 5% de significância para manejos de irrigação. Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem pelo teste LSD a nível de 5% de significância para inoculantes.

Os resultados deste estudo mostraram que após a imposição do estresse e reidratação das plantas de soja, a altura de planta e índice de área foliar aumentaram em comparação com o tratamento controle (I100VFR), reduzindo a diferença ou sendo superior ao controle, indicando compensação de crescimento.

O efeito de compensação é um mecanismo de autodefesa e autorregulação utilizado pelas plantas após estresses e danos ambientais, como resposta após o estresse ser aliviado, tem-se curto e rápido crescimento da altura da planta, área foliar e taxa de crescimento (ACEVEDO et al., 1971; BU et al., 2009; LI et al., 2014; DAI, 2007; LIU et al., 2012; GAO et al., 2007). E assim como atestado por Dong et al. (2019), o efeito de compensação na soja dependeu do nível do estresse hídrico e do estágio de crescimento em que ocorreu o estresse, pois o efeito de compensação foi maior quando ocorreu nos estágios iniciais de crescimento (V) em comparação com os estágios posteriores (F e R). Além disso, a reidratação após estresse hídrico severo levou à supercompensação, e estar de acordo com Dong et al. (2019), em que o efeito de compensação, na maioria dos casos, não foi maior após estresse moderado de seca na soja.

A depleção de água não teve efeito severos sobre a altura de planta em nenhum manejo de irrigação deficitário na fase de enchimento de grãos (Tabela 7). Isso pode ser atribuído ao fato de que poucas folhas são produzidas durante e após a floração (ALOU et al., 2018) e a duração do estresse hídrico foi insuficiente para reduzir a altura de plantas.

A redução da água afetou a produtividade dos grãos, mas cada inoculante teve respostas diferentes à seca. Por exemplo, sob moderado estresse na floração (I70F), o inóculo com *Beauveria bassiana* (BB) e *Metarhizium* sp (MA), obtiveram produtividade de 4.300 e 3.800 kg ha⁻¹, respectivamente, superiores ao inóculo apenas com *Bradyrhizobium* (BJ), com 2.800 kg ha⁻¹. Este foi um resultado bastante positivo, pois Cunha e Bergamaschi (1992), Casagrande et al. (2001) e EMBRAPA (2002) concluem que o período mais sensível da soja à escassez de água no solo é o florescimento porque envolve diretamente a formação dos componentes de rendimento.

Em adição, resultados obtidos por Palharini (2016) aponta que o pré-florescimento, formação de vagens e enchimento de grãos são as fases mais sensíveis à deficiência hídrica e resultou em queda de produtividade e de alguns componentes de rendimento.

Os danos ao número de vagens e aos demais componentes de rendimento, de modo geral, foram maiores quando os estresses foram aplicados no ciclo completo, porém, a ocorrência de estresse severo apenas no florescimento tem o mesmo efeito, devido ao aborto de flores nessa fase; no entanto, a inoculação com os fungos entomopatogênicos foi capaz de reverter este dano a soja em comparação com o inoculante BJ. Cunha et al. (2013), concluíram que o efeito significativo do manejo de irrigação sobre componentes de rendimento pode ser explicado pela ocorrência de déficit hídrico na floração com 60 e 40% menos água. O número de vagens totais encontrado neste trabalho foi semelhante ao encontrado por Fioreze et al. (2011), em que três cultivares de soja submetidas a déficit hídrico, no início do estágio reprodutivo, observaram diminuição do número de vagens totais, em duas cultivares estudadas, interferindo na produtividade da cultura (DEMIRTAS et al., 2010). Assim, dos componentes de produção da soja, este é o um dos parâmetros mais importantes, pois disponibilidade de água adequada é necessária para a produção de vagens, principalmente em cultivares de alta produtividade (BÁRBARO et al., 2006; COMLEKCIOGLU e SIMSEK, 2011).

Jumrani e Bhatia (2018), mostraram que a plasticidade e consequente recuperação das plantas submetidas a estresse hídrico no período vegetativo apresentava menor efeito sobre o rendimento de grãos, enquanto no período reprodutivo não havia plasticidade para recuperação do estresse, resultando em severa redução da produtividade.

Ao analisar o crescimento das plantas em número de nós (Tabela 7), verificou-se que o déficit hídrico também influenciou a diferenciação de nós durante o desenvolvimento da cultura, em que os manejos com imposição de estresse no período vegetativo apresentaram maiores médias, isso se deve principalmente, ao efeito de compensação do crescimento observado. E isto fica mais evidente pela

cultivar usada ser de tipo de crescimento indeterminado, assim, tem como característica não cessar o seu crescimento com o início do florescimento, ao contrário dos genótipos de crescimento determinado (VAZ BISNETA, 2015). Zilio (2014) em estudo sobre restrição hídrica na soja, observou incremento do número de nós até o estágio R5 em plantas com plena irrigação e até o estágio R4 nas plantas com restrição hídrica, com redução no número total de nós e na taxa de emissão de nós.

Quanto à massa de 100 grãos, assim como observado por Kuss et al. (2008), verificou-se maior massa de grãos para plantas que passaram por estresse hídrico, com maior média obtida no manejo I50R (13,19 g). Resultado similar foi encontrado por Felisberto (2015) ao submeter a soja a períodos de estresse hídrico de 0, 6, 9 e 12 dias. Quando se analisa o diâmetro de caule houve diferença apenas na interação entre manejos, porém essas diferenças não foram tão acentuadas, verifica-se que neste aspecto Sousa e Lima (2010) em estudo do efeito da supressão da irrigação em distintas fases de desenvolvimento no feijão, constataram que o diâmetro de caule também não foi influenciado pela supressão de irrigação.

A eficiência do uso da água (EUA) com base em todo o ciclo de cultivo variou de 0,5 a 1,57 kg m⁻³ (Figura 9A). Valores médios maiores foram observados em BJ para os manejos I100VFR, I70VFR, I70V, I70R e I50R. Não houve diferença estatística da EUA nos manejos inoculados com BB, esta variou de 1,38 kg m⁻³ em I50R a 0,91 g m⁻³ em I100VFR. O estresse moderado na floração (I70F) reduziu a EUA de MA e BJ em 7 e 32%, respectivamente, enquanto no enchimento de grãos (I70R), houve redução de 8% (BJ) e 44% (MA) (Figura 9A). No estresse severo, a EUA no estágio de floração (I50F) não apresentou diferença significativa entre inoculantes, porém durante o enchimento e maturação de grãos (I50R) para BB e MA, não apresentaram maiores valores que BJ, sendo o inoculante base superior aos demais.

O índice de colheita (IC) variou de 0,13 a 0,47 (Figura 9B). Em comparação com I100VFR, o IC para estresse ao longo do ciclo (I70VFR e I50VFR) houveram reduções para BB, MA e BJ. Em contraste, o estresse moderado na floração (I70F) reduziu o IC em MA e BJ em 12 e 35%, respectivamente, em comparação com BB. Estresse severo no estágio vegetativo (I50V) não reduziu IC em BB (Figura 9B), no entanto, maior redução foi observada em MA de 66% e a menor redução em BJ de 45%. Os valores médios de EUA e IC revelaram que nos manejos com alto consumo hídrico por ciclo, que corresponde aos manejos com imposição de estresse em períodos de menor demanda hídrica e não críticos à falta de água; os inoculantes BB e MA podem afetar negativamente esses índices, no entanto, sob estresse moderado ou severo no período de floração podem apresentar valores maiores que a inoculação tradicional (Figura 9AB).

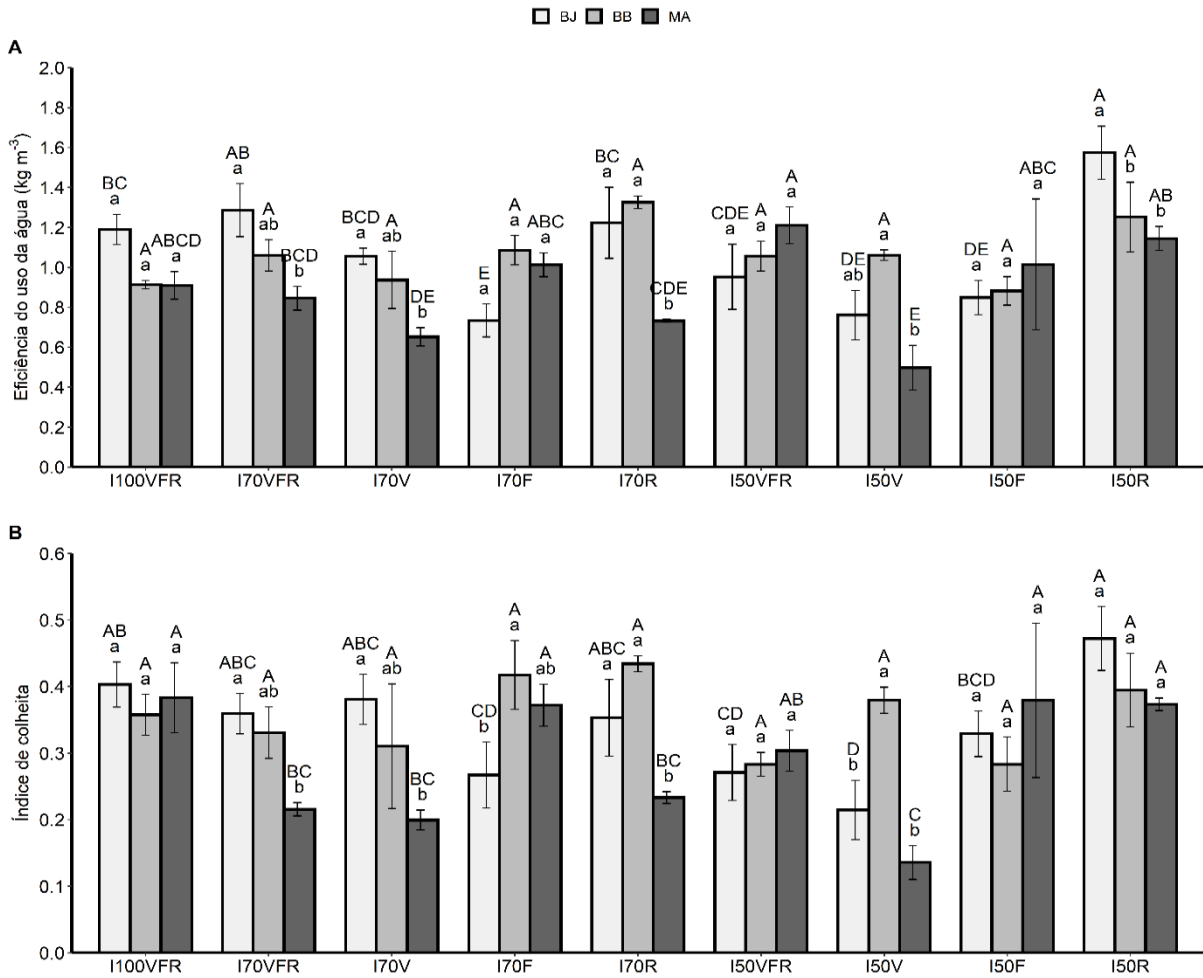


Figura 9. Eficiência do uso da água e índice de colheita de soja inoculada submetida a nove manejos de irrigação. Os dados indicam a média \pm EP (erro padrão). I100VFR – 100% da CAD ao longo do ciclo completo; I70VFR – 70% da CAD ao longo do ciclo completo; I70V – 70% na fase vegetativa; I70F – 70% na fase de floração; I70R – 70% na fase de enchimento de grãos; I50VFR – 50% da CAD ao longo do ciclo completo; I50V – 50% na fase vegetativa; I50F – 50% na fase de floração; I50R – 50% na fase de enchimento de grãos. Inoculantes: BJ – *Bradyrhizobium japonicum*; MA – *Beauveria bassiana*; MA – *Metarhizium anisopliae*. Médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem pelo teste LSD a nível de 5% de significância para cada inoculante nos diferentes manejos de irrigação. Médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem pelo teste LSD a nível de 5% de significância para diferentes inoculantes dentro de cada manejo de irrigação.

A EUA com base em todo o ciclo de crescimento da soja não foi melhorada por estresse moderado ou severo durante o estágio vegetativo, porém apresentou altos valores para imposição de estresse na floração e enchimento de grãos, principalmente para BB (Figura 9A). Por outro lado, o estresse moderado ou severo para o inoculante MA teve a maior redução na EUA durante os períodos vegetativo e de enchimento de grãos, com exceção de estresse severo na floração e enchimento e maturação de grãos (I50F e I50R). Esta resposta mostra que a cultura foi menos eficiente à medida que a entrada de água foi reduzida em períodos não críticos a falta de água, no caso no período vegetativo e maturação de grãos. Essa resposta era esperada, uma vez que a perda de rendimento de grãos foi significativa (Tabela 6). Respostas semelhantes foram relatadas por Burriri et al. (2002), que relataram que a EUA aumentou com o estresse hídrico. Candogan et al. (2013) também encontraram

EUA mais alto sob estresse hídrico em comparação com o manejo bem irrigado, embora o manejo com 25% da CAD tenha oferecido maior EUA, causou uma redução de rendimento de 27%. Portanto, o alto índice de EUA é bem visto desde que mantenha alto rendimento de grãos ou de biomassa (GORTHI et al., 2019). No geral, a resposta da EUA mostrou que, sob certas condições de manejos de irrigação, os fungos entomopatogênicos podem expressar seu potencial de aporte máximo a economia de água e, sob diferentes graus de estresse hídrico, fornece informações claras sobre épocas de imposição de estresse na soja.

O IC teve comportamento similar à EUA. Os valores encontrados neste estudo foram semelhantes aos encontrados por Gajić et al. (2018), que indicaram valores de 0,36 a 0,40 para níveis de irrigação de 100 a 40%. Em média, o I50R (BJ) apresentou maior média e I50VFR as menores médias (Figura 9B). Essa redução no IC sob forte estresse (I50VFR) sugere um grande acúmulo de biomassa (caules e folhas) combinado com um menor rendimento de grãos com imposição de estresse ao longo de todo o ciclo cultural. Sincik et al. (2008), afirmam que o IC tende a ser maior em tratamentos não irrigados, mas com variação irregular. Já Pedersen e Lauer (2004) atestaram que a irrigação reduziu o IC em 2%, em média. Em apoio a esse estudo Demirtas et al. (2010) afirmaram que o IC de soja irrigada por gotejamento não foi afetado por estresse hídrico e Garcia y Garcia et al. (2010) observaram que diferentes regimes de irrigação não afetaram o IC da soja em uma região úmida do sudeste dos EUA.

4.1. Respostas fisiológicas ao déficit hídrico

A ANOVA tridimensional revelou que houve diferença significativa a nível de 1% de probabilidade na interação entre manejos de irrigação, inoculantes e período de mensuração para todas as variáveis fisiológicas (Tabela 9). Em adição, as variáveis fisiológicas não foram significativas para as fontes de variação inoculante (F) e a interação F x T.

Tabela 9. Análise de variância (valor F) correspondente aos parâmetros fisiológicos em função da interação de manejos de irrigação e inoculação na soja, Piracicaba, SP, 2020.

Fonte de variação	GL	A	gs	E	iEUA	Ψ_{foliar}
Manejo (M)	8	20,23**	32,43**	29,31**	36,88**	6,43**
Inoculante (F)	2	2,25 ^{ns}	1,30 ^{ns}	2,11 ^{ns}	2,26 ^{ns}	0,69 ^{ns}
Estádio (T)	1	69,35**	93,13**	22,71**	8,56**	244,35**
M x F	16	2,32**	3,73**	3,14**	3,54**	4,12**
M x T	8	25,38**	36,97**	31,38**	38,69**	5,83**
F x T	2	1,38 ^{ns}	0,48 ^{ns}	0,36 ^{ns}	0,61 ^{ns}	1,66 ^{ns}
M x F x T	16	3,12**	5,15**	4,26**	3,88**	2,21**

Em que: GL – grau de liberdade; A – taxa de fotossíntese líquida; gs - condutância estomática; E – transpiração; iEUA – eficiência intrínseca do uso da água; Ψ_{foliar} – potencial hídrico foliar; * significativo pelo teste f a 5% de probabilidade; ** significativo pelo teste f a 1% de probabilidade; ns - não significativo.

A resposta fisiológica da soja inoculada com fungos entomopatogênicos aos manejos de irrigação são apresentadas na Figura 10.

Os parâmetros fisiológicos taxa fotossintética (A), condutância estomática (g_s) e taxa de transpiração (E) diminuíram sob estresse hídrico moderado e severo (I70 e I50) na mensuração do período reprodutivo (fase de enchimento de grãos) (I70R e I50R) para todos os inoculantes, com exceção dos manejos I70R e I50VFR inoculados com BJ, que tiveram aumento de A , g_s e E , mesmo sobre estresse (Figura 10 - A, B e C). Nesta fase, A , g_s e E para BB sob estresse hídrico moderado (I70R) tiveram ligeiras reduções de 22, 56 e 20%, enquanto sob estresse hídrico severo (I50R), este inoculante teve maiores reduções de 67, 95 e 88%, respectivamente (Figuras 10 - A, B, C). No estágio vegetativo, os valores de A , g_s e E sob plena irrigação (I100VFR) foram semelhantes entre os inoculantes e não houve diferença significativa entre estes. Nesta fase fenológica, a soja inoculada por BB foi mais afetada pelo estresse hídrico severo (I50V). Assim, com este inoculante houve redução de A , g_s e E em 72, 79 e 73%, respectivamente, em comparação com BJ que apresentou maiores valores. A $iEUA$ aumentou sob estresse moderado e severo no estágio vegetativo em todos os inoculantes, bem como no enchimento de grãos. Além disso, o $iEUA$ sob forte estresse na maturação de grãos (I50R) em BB, MA e BJ apresentaram valores ideais na primeira mensuração (Figura 10 - D).

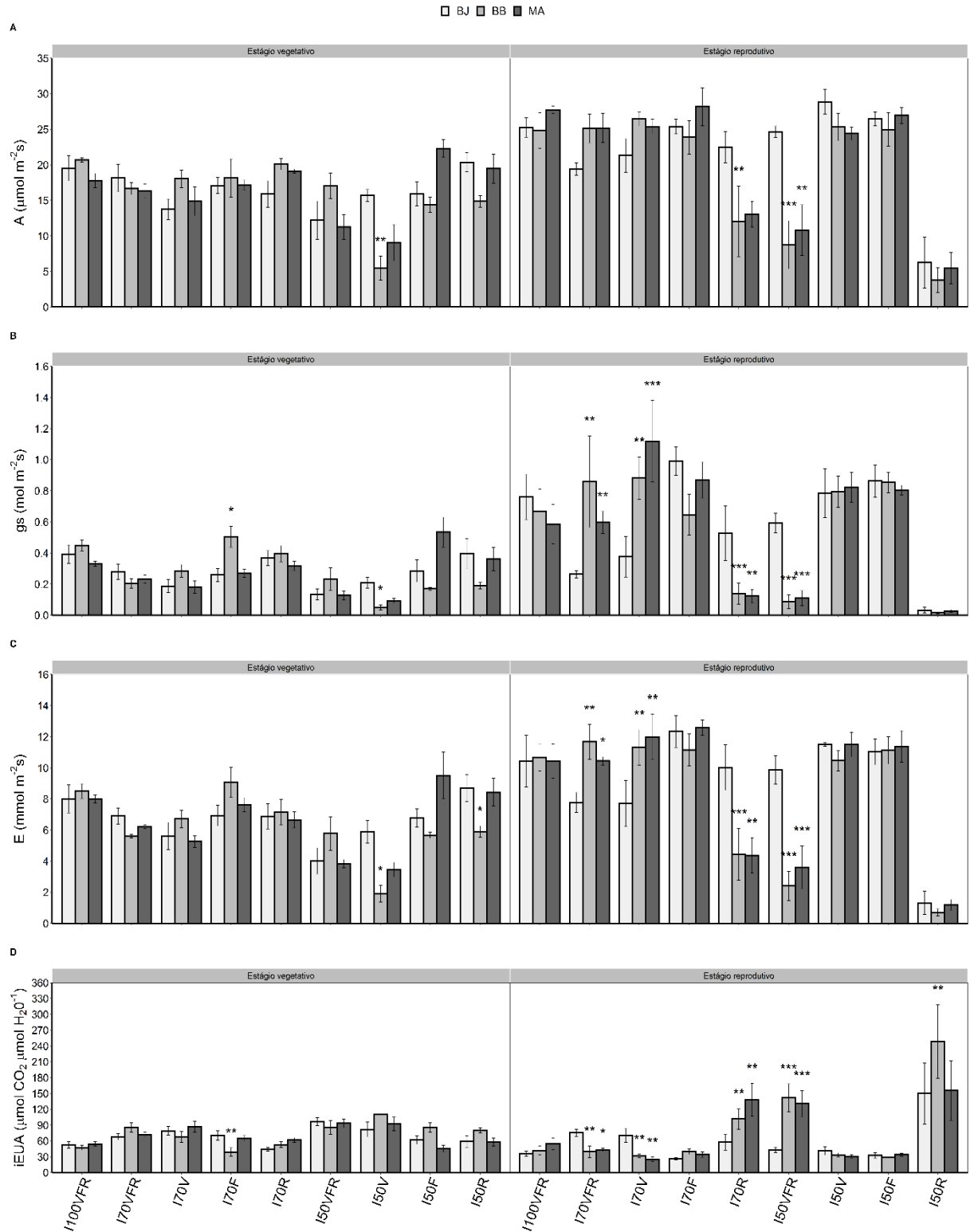


Figura 10. Características de trocas gasosas de soja inoculada com fungos entomopatogênicos submetida a nove manejos de irrigação. A, Taxa fotossintética (A); B, condutância estomática (g_s); C, Transpiração (E) e D, Eficiência intrínseca do uso da água (iEUA) na fase vegetativa e reprodutiva. *, **, *** indicam diferenças significativas nos níveis de 0,05, 0,01 e 0,001, respectivamente, de BJ dentro os inoculantes, dentro de manejos de irrigação. I100VFR – 100% da CAD ao longo do ciclo completo; I70VFR – 70% da CAD ao longo do ciclo completo; I70V – 70% na fase vegetativa; I70F – 70% na fase de floração; I70R – 70% na fase de enchimento de grãos; I50VFR – 50% da CAD ao longo do ciclo completo; I50V – 50% na fase vegetativa; I50F – 50% na fase de floração; I50R – 50% na fase de enchimento de grãos. Inoculantes: BJ – *Bradyrhizobium japonicum*; MA – *Beauveria bassiana*; MA – *Metarhizium anisopliae*.

O presente estudo mostrou que estresses moderados e severos causaram reduções na fotossíntese (A), condutância estomática (g_s) e transpiração (E) (Figura 10 - A, B e C). A redução das características de troca gasosa devido ao estresse hídrico foi relatada em outros estudos com a cultura da soja (BERTOLLI et al., 2012; CHAVARRIA et al., 2015; FAROOQ et al., 2009; HONNA et al., 2016; JALEEL et al., 2009; OHASHI et al.; 2006; YE et al., 2018; VARONE e GRATANI 2015; ZHANG et al., 2016). A transpiração de plantas e taxa fotossintética são fortemente correlacionados um ao outro através da condutância estomática (BALL et al., 1987; YOO et al., 2009), assim, aumento de g_s a baixos valores, tende elevar A e E linearmente (FARQUHAR e SHARKEY, 1982; YOO et al., 2009). Além disso, este experimento teve manejo de seca de curto prazo e irrigação de alta frequência, com isso as plantas de soja diminuíram g_s com limitação da E para evitar potencial perda de turgor foliar (SCOFFONI et al., 2017). A forte relação entre A e g_s indica que a redução em A foi principalmente regulada pelo fechamento estomático. Assim, o alto coeficiente de correlação entre A e g_s para os três tipos de inoculante leva a predomínio do fechamento estomático para a redução da taxa fotossintética (CASAROLI e VAN LIER, 2008).

Zhou et al. (2019) argumentaram que os efeitos não estomáticos na fotossíntese passam a dominar sob alta intensidade e duração da seca. Ainda de acordo com Flexas et al. (2004), a condutância estomática é um indicador bastante sensível ao estresse hídrico e os autores consideram estresse hídrico severo quando os valores de condutância estão abaixo de $0,1 \text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, o que foi observado no estresse ocorrido na fase de enchimento de grãos. Taxas mais baixas de diminuição em A , g_s e E foram observadas na fase vegetativa do que no enchimento de grãos sob estresse moderado. No entanto, embora rendimentos mais elevados tenham sido relatados com tratamentos de estresse no enchimento de grãos em comparação com a floração ou vegetativo, não é possível inferir que isso se deva a melhores taxas de troca gasosa. É necessária uma validação adicional, uma vez que um estudo anterior indicou que as plantas no estágio fenológico posterior poderiam usar carboidratos que foram acumulados durante a pré-antese ao reduzir a taxa fotossintética sob estresse, principalmente em soja de tipo de crescimento indeterminado (BORÉM, 2000).

A eficiência intrínseca do uso de água (iEUA) medida com IRGA no nível da folha neste experimento estar de acordo com a abordagem proposta por Gorthi et al. (2019), que propõem que se g_s diminui mais do que A , há aumento da iEUA, como uma resposta estomatal durante a seca. O aumento observado na iEUA nos estádios de imposição de estresse em nosso estudo, mostra que o declínio da g_s foi maior que o declínio da A . Outros estudos também relataram aumento da iEUA ocasionado por um declínio de g_s sobre condições de estresse hídrico e alto déficit de pressão de vapor em cevada (BARBOUR et al., 2011) e soja (GILBERT et al., 2011). No entanto, devido à complexidade dos processos envolvidos, a eficiência do uso da água no nível da folha na soja apresenta muitas abordagens, por exemplo, segundo Blum (2009), valores baixos de iEUA são devidos

à altas E e g_s sob déficit hídrico, o que foi atestado neste experimento, em que sobre irrigação deficitária todos os inoculantes utilizados na soja apresentaram reduções de $iEUA$ tanto na fase vegetativa quanto na reprodutiva. Assim como, baixa E leva a altos valores de $iEUA$ e na soja esta variável fisiológica é negativamente correlacionada com g_s e E (EAL, 2002). Apesar disso, Eck et al. (1983) e Liu et al. (2005) afirmam poder encontrar menores ou maiores valores relacionados a $iEUA$ quando comparado manejo sem estresse até o nível mais severo e que tais diferenças podem estar correlacionadas a metodologia empregada.

O potencial hídrico foliar (PHF) entre os inoculantes apresentou valores mais baixos sob moderado e forte estresse hídrico na mensuração na fase vegetativa (I70V e I50V), com aumento na fase reprodutiva (Figura 11). O PHF variou entre -0,31 MPa no BB, -0,38 MPa no MA e -0,21 MPa no BJ sob I50VFR na segunda mensuração; e variou entre -0,71, -0,39 e -0,6 MPa, respectivamente na fase vegetativa. Em comparação com I100VFR, o PHF para MA apresentou diferenças entre as mensurações, no entanto, BJ e BB não apresentaram diferença significativa (Figura 11). Na fase de enchimento de grãos sob estresse moderado (I70R) no estágio vegetativo, PHF apresentou diferença significativa entre BB e BJ, entre as mensurações (Figura 11). Tanto os manejos com estresse moderado quanto severo ao longo do ciclo, apresentaram as maiores aumento do potencial hídrico foliar na segunda mensuração; resultado inesperado pois justamente por maior demanda hídrica na fase reprodutiva devido ao enchimento de grãos, esperava-se menor potencial hídrico foliar das plantas.

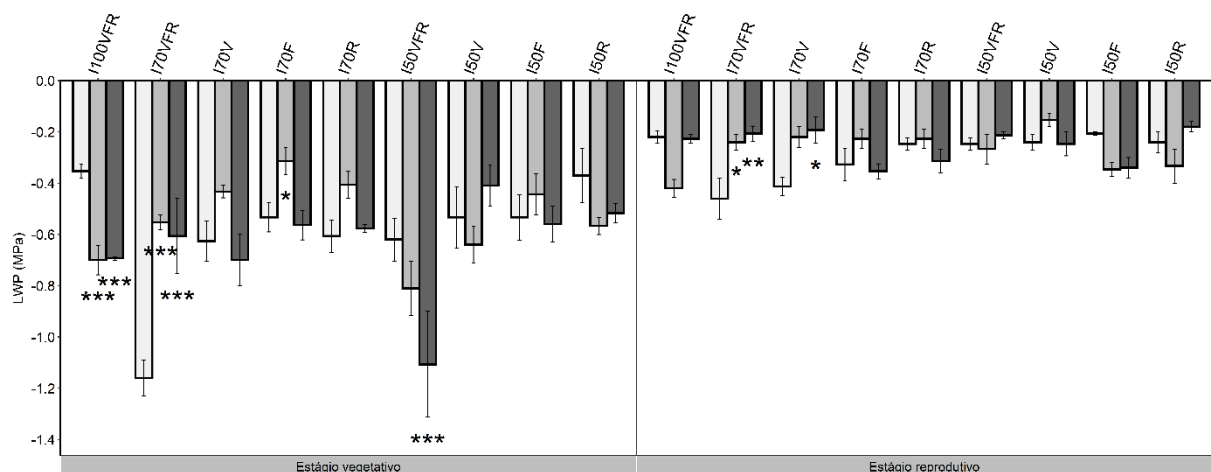


Figura 11. Potencial hídrico foliar (PHF) de soja inoculada com fungos entomopatogênicos submetida a nove manejos de irrigação. Os dados indicam a média \pm EP (erro padrão). PHF na fase vegetativa e reprodutiva. *, ** e *** indicam diferenças significativas nos níveis de 0,05, 0,01 e 0,001, respectivamente, de BJ dentre os inoculantes, dentro de manejos de irrigação. I100VFR – 100% da CAD ao longo do ciclo completo; I70VFR – 70% da CAD ao longo do ciclo completo; I70V – 70% na fase vegetativa; I70F – 70% na fase de floração; I70R – 70% na fase de enchimento de grãos; I50VFR – 50% da CAD ao longo do ciclo completo; I50V – 50% na fase vegetativa; I50F – 50% na fase de floração; I50R – 50% na fase de enchimento de grãos. Inoculantes: BJ – *Bradyrhizobium japonicum*; MA – *Beauveria bassiana*; MA – *Metarhizium anisopliae*.

Neste estudo, o PHF sob estresse moderado na floração não diferiu entre os inoculantes (Tabela 9). Por outro lado, o estresse hídrico severo diminuiu o PHF para todos os inoculantes nos estágios vegetativo e enchimento de grãos. Hossain et al. (2014) observaram valores variando de -0,40 a -0,55 MPa em plantas bem irrigadas e de -2,28 a -1,85 MPa em plantas com restrição hídrica. Portanto, uma seca severa pode afetar o PHF, independentemente de sua inoculação. De acordo com Salisbury e Ross (2013), os valores de potencial obtidos pela câmara de Scholander são referentes ao potencial osmótico da seiva e para a maioria das plantas cultivadas devem variar de -0,4 a -2,0 MPa. Barbosa (2017), em pesquisa sobre o limite crítico do potencial hídrico da soja durante o estágio vegetativo sob três níveis de déficit hídrico (100%, 55% e 45% da capacidade de campo), inferiu que potenciais hídricos do xilema abaixo de -0,90 MPa são prejudiciais para a cultura por reduzir todos os parâmetros avaliados e abaixo de -1,3 MPa no estágio reprodutivo.

De modo geral, os valores de PHF para I100VFR corroboram com os resultados encontrados por Liu et al. (2005), Kron et al. (2008) e Fulton et al. (2014) que ao cultivarem soja mantendo o suprimento adequado de água, encontraram potenciais em torno de -0,60, -0,40 e -0,78 MPa, respectivamente. Em tratamentos com restrição hídrica Liu et al. (2005) e Catuchi et al. (2012) verificaram potenciais em torno de -1,7 e -2,5 MPa, respectivamente. Esses valores diferem um pouco dos relatos neste trabalho, mas se devem a metodologia empregada, por exemplo Catuchi et al. (2012) realizaram reposição de 40% da capacidade de campo, enquanto neste experimento em questão a menor reposição foi de 50% da CAD.

Na figura 12 é apresentada uma matriz de correlação dentre as variáveis de rendimento, crescimento e fisiológicas no período vegetativo (Figura 12A) e reprodutivo (Figura 12B). As variações dos coeficientes encontrados em cada período são explicadas pela imposição de déficit hídrico em distintos estágios em cada período.

A produtividade da soja apresentou correlação fraca positiva tanto com as variáveis fisiológicas (A , gs , E e $iEUA$) quanto com os componentes de rendimento e crescimento, em ambos os períodos, porém apresentou forte correlação com eficiência do uso da água (EUA) e índice de colheita (IC) com R^2 variando de 0,80 a 0,90. A , gs e E , mostraram correlação forte entre si, em ambos os períodos.

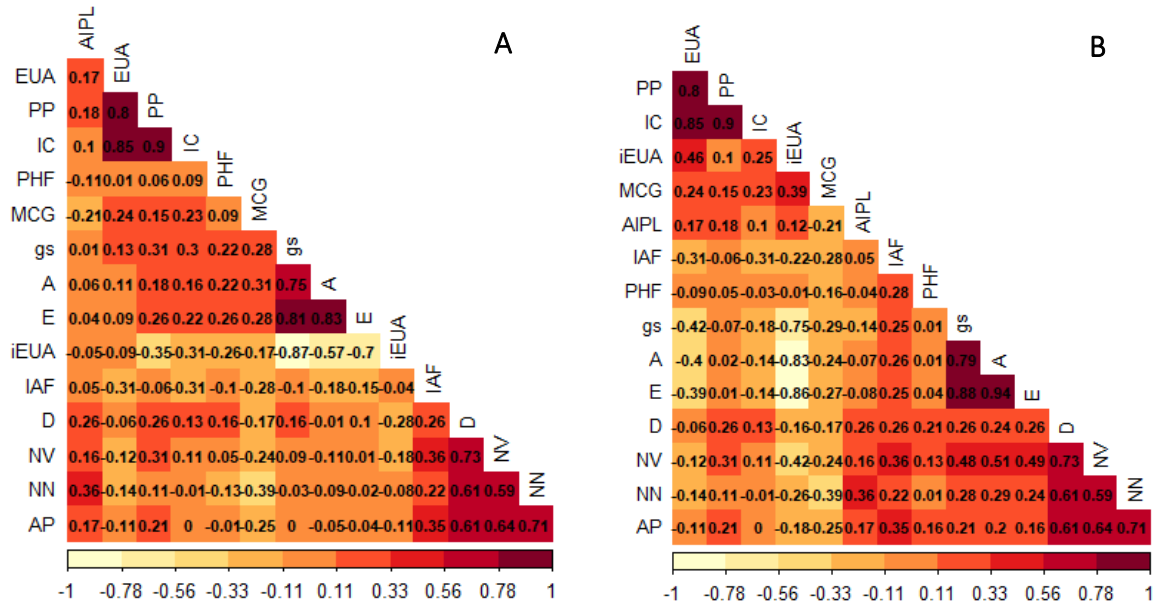


Figura 12. Correlações (coeficiente de correlação de Pearson) entre as medidas das características fisiológicas, produtividade e componentes de rendimento, para cada um dos períodos de mensurações das trocas gasosas. AIPL – altura de inserção do primeiro legume; EUA – eficiência do uso da água; PP – produtividade potencial; IC – índice de colheita; PHF – potencial hídrico foliar; MCG – massa de cem grãos; gs – condutância estomática; A – taxa de fotossíntese líquida; E – transpiração; iEUA – eficiência intrínseca do uso da água; IAF – índice de área foliar máximo; D – diâmetro; NV – número total de vagens por planta; NN – número total de nós por vagem.

A Análise de Componentes Principais (PCA – Principal Component Analysis) também foi usada em cada período de mensuração dos dados fisiológicos para examinar a relação entre a eficiência do uso da água, produtividade, componentes do rendimento de grãos e características fisiológicas. O primeiro e o segundo componentes explicaram 65,10% e 66,80% da variância para PCA – Vegetativo e PCA – Reprodutivo, respectivamente (Figura 13). De acordo com Hair et al. (1998), o ângulo agudo formado entre retas de variáveis significa correlação positiva, o ângulo obtuso mostra relações negativas e o ângulo reto não mostra correlação entre as diferentes características e ainda, vetores de variáveis altamente correlacionadas tendem a ficar juntas e na mesma direção. Assim, a produtividade foi positivamente correlacionada com EUA, IC, AIPL e MCG (Figura 13) em ambos os PCAs. Além disso, A, gs, E e PHF apresentaram correlação positiva entre eles. O IAF teve comportamento particular em cada PCA (Figura 15). A distância entre manejos de irrigação é uma resposta da sua similaridade em relação às variáveis, assim observou-se que os manejos I50VFR para todos os inoculantes apresentavam curta distância nos pontos, assim como, os manejos com estresse no florescimento (F) estavam em lados opostos aos vetores das variáveis, representando falta de correlação com as variáveis respostas, isto pode ser explicado pela falta de mensuração de dados fisiológicos neste período, no qual as condições climáticas não possibilitaram esta mensuração. Esses resultados sugerem que algumas características fisiológicas de soja estão intimamente relacionadas às respostas de produção e que essas relações variam entre os manejos aqui estudados.

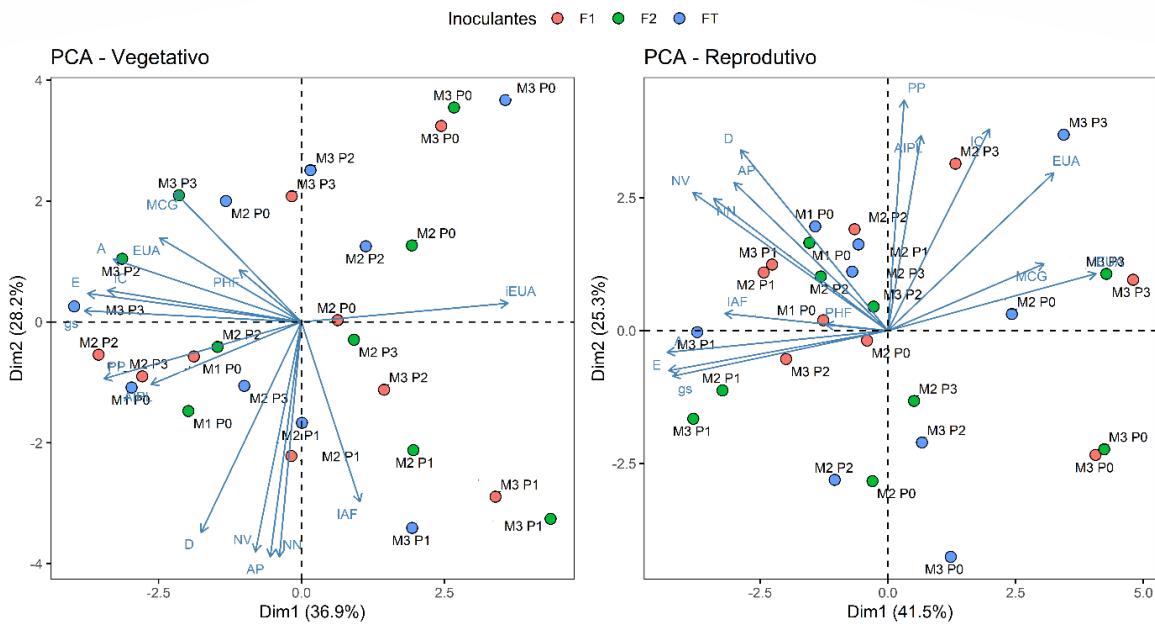


Figura 13. Análise de componentes principais (PCA). Parcelas de pontuação de local das variáveis estudadas nos manejos empregados, de acordo com os três inoculantes usados na soja. Eficiência do uso de água, EUA; produtividade, PP; índice de colheita, IC; altura de inserção do primeiro legume número de nós, NN; altura de plantas, AP; índice de área foliar máximo, IAF; massa de cem grãos, MCG; número de vagens, NV; potencial hídrico foliar, PHF; taxa de fotossíntese líquida, A; condutância estomática, gs; transpiração, E e eficiência intrínseca do uso da água, iEUA. I100VFR – 100% da CAD ao longo do ciclo completo; I70VFR – 70% da CAD ao longo do ciclo completo; I70V – 70% na fase vegetativa; I70F – 70% na fase de floração; I70R – 70% na fase de enchimento de grãos; I50VFR – 50% da CAD ao longo do ciclo completo; I50V – 50% na fase vegetativa; I50F – 50% na fase de floração; I50R – 50% na fase de enchimento de grãos. Inoculantes: BJ – *Bradyrhizobium japonicum*; MA – *Beauveria bassiana*; MA – *Metarhizium anisopliae*.

A eficiência intrínseca do uso da água (iEUA) medida com IRGA no nível da folha e a interação com a eficiência do uso da água (EUA) a nível de campo, neste experimento é contraditória, no aspecto de atribuir tolerância à seca para soja com maior iEUA e/ou EUA. Pois como visto na matriz de correlação de Pearson e no PCA, a interação destas duas variáveis na mensuração do período vegetativo apresentou correlação negativa ($R = -0,09$) e ângulo obtuso entre os dois vetores no PCA, enquanto que, para a mensuração do período reprodutivo, verificou-se correlação positiva fraca ($R = 0,46$), com proximidade entre os dois vetores. Essas diferenças podem ser causadas por mecanismos morfo-fisiológicos e efeitos espaço-temporais (BLUM, 2009). Deste modo, todos os inoculantes não apresentaram alta correlação entre EUA e iEUA (Figura 12 e 13). Medrano et al. (2015) concluíram que não há correspondência entre EUA ao nível da folha e EUA ao nível de campo devido à influência da interceptação de luz, transpiração noturna e perdas respiratórias. Portanto, o iEUA não pode ser usada como um método para estimar a EUA.

Outra abordagem a se considerar neste estudo é o aporte do uso dos fungos entomopatogênicos em distintas épocas de aplicação na cultura da soja. Como visto, o efeito benéfico da inoculação dos fungos dependeu do período de imposição do estresse e do manejo hídrico adotado, uma vez que sob irrigação plena houve indicativo de queda na produtividade dos tratamentos com os inóculos fúngicos. Assim, como forma de tentar reproduzir estes resultados

científicos no campo e viabilizar a logística da inoculação, uma possibilidade em aberto seria a inoculação dos fungos em plantios de soja sobre irrigação subterrânea por gotejamento, onde possibilitaria a inoculação em diferentes fases do ciclo de produção, como em épocas que antecedem os períodos críticos de floração e enchimento de grãos.

Visto também que, em condições de campo de sequeiro, a reposição da umidade do solo no ponto de capacidade de campo todos os dias do ciclo, não ocorre, devido justamente a dependência climática, então, manter uma condição tal qual o manejo I100VFR, é possível apenas na irrigação por gotejamento pleno e assim, em anos com boa e regular precipitação pluviométrica, pode-se apresentar na agricultura de sequeiro condições similares ao manejo da irrigação de I70 e provavelmente, em anos mais secos prevaleça condições hídricas similares ao manejo I50. Isto ressalta a importância da adoção e desenvolvimento de novas técnicas de cultivo para sequeiro.

Portanto, a inoculação de fungos entomopatogênicos em plantas abre mais possibilidades para a exploração das interações dos mesmos, principalmente quando pretende-se aproveitar da capacidade endofítica destes fungos na atenuação de estresses abióticos como o déficit hídrico. Ainda, estudos futuros são necessários com diferentes variedades de soja, diferentes isolados fúngicos como *Isaria fumosorosea* e *Tricoderma* sp. e diferentes concentrações da solução fúngica. Todos esses fatores devem ser considerados para o planejamento de uma nova técnica de cultivo com a inoculação de fungos.

5. CONCLUSÃO

Confirmou-se parcialmente a hipótese inicial do trabalho que existe potencial de mitigação ao estresse hídrico na cultivar de soja convencional estudada em simbiose com os fungos *Beauveria* e *Metarhizium*; porém esta simbiose só foi manifestada em 2 dos 9 tratamentos de manejo hídrico estudados para cada fungo analisado: em *Beauveria* no tratamento de 70% da CAD na fase de florescimento (I70F) e *Metarhizium* no tratamento de 50% da CAD na fase de enchimento de grãos (I50R).

Em condições bem irrigadas, a eficiência do uso da água (EUA) medida ao longo de toda a safra, variou de 0,90 a 1,19 kg m⁻³ dentre os inoculantes, ademais, a coinoculação com *Beauveria bassiana* foi capaz de aumentar a EUA no florescimento e enchimento dos grãos da soja sobre estresse hídrico em comparação com a inoculação apenas com *Bradyrhizobium japonicum*. Os resultados destacam a importância do manejo de precisão da água para explorar totalmente o potencial dos fungos entomopatogênicos, reduzindo a quantidade de água aplicada em condições de irrigação por gotejamento sem perdas significativas de produção.

O potencial de rendimento de grãos dentre os manejos de irrigação testados variou entre 1.800 kg ha⁻¹ e 4.780 kg ha⁻¹, com menor desempenho para imposições de estresse moderado e severo ao longo de todo ciclo cultural. Neste ensaio, foi constatado que a penalidade no rendimento de grãos depende do estágio, do nível de estresse hídrico e da inoculação de sementes.

Os fungos entomopatogênicos coinoculados mantiveram a produtividade da soja alta sobre estresse moderado na fase de floração, mas com maior penalidade no enchimento de grãos tanto para estresse moderado quanto severo. Para a condição de irrigação plena (capacidade de campo de 100%) a coinoculação com os fungos resultou em decréscimo da produtividade da soja. De modo geral, os tratamentos inoculados com *Beauveria bassiana* proporcionaram melhores resultados de rendimento de grãos e nos componentes de rendimento do que com o fungo *Metarhizium* sp.

Os traços de troca gasosa *A*, *gs* e *E* explicaram os efeitos causados pelo déficit hídrico, mas não necessariamente valores altos se refletem na melhoria da produtividade ou nos componentes do rendimento, como visto na matriz de correlação de Pearson. O potencial hídrico foliar e a eficiência intrínseca do uso da água (iEUA) tiveram respostas similares à seca para os inoculantes estudados.

Portanto, o aprimoramento da tecnologia de coinoculação da soja é de grande interesse dos agricultores, bem como da comunidade científica, visto que poderá propiciar maior segurança de produtividade em áreas de sequeiro e irrigadas sob déficit.

REFERÊNCIAS

- ACEVEDO, E.; HSIAO, T. C.; HENDERSON, D. W. Immediate and subsequent growth responses of maize leaves to changes in water status. **Plant Physiol.**, v. 48, n. 5, pp. 631-636, 1971.
- AKELLO, J. et al. The effects of *Beauveria bassiana* dose and exposure duration on colonization and growth of tissue cultured banana (*Musa sp.*) plants. **Biological Control**, New York, v. 49, n. 1, p. 6-10, Apr. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.06.002>.
- ALLIPRANDINI, L. F.; ABATTI, C.; BERTAGNOLLI, P. F.; CAVASSIM, J. E.; GABE, H. L.; KUREK, A.; MATSUMOTO, M. N.; OLIVEIRA, M. A. R. de; PITOL, C.; PRADO, L. C.; STECKING, C. Understanding soybean maturity groups in Brazil: Environment, cultivar classification, and stability. **Crop Science**, v. 49, p. 801-808, 2009.
- ALMEIDA, J. P. N. de; DANTAS, L. L. de G. R.; ARRAIS, I. G.; TOSTA, M. da S.; MENDONÇA, V. Fungo micorrízico arbuscular e extrato de algas no crescimento inicial de porta-enxerto de aceroleira. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 57, n. 1, p. 22-28, jan./mar., 2014.
- ALOU, I.N., STEYN, J.M., ANNANDALE, J.G., VAN DER LAAN, M. Growth, phenological, and yield response of upland rice (*Oryza sativa* L. cv. Nerica 4[®]) to water stress during different growth stages. **Agricultural Water Management**, v. 198, 39-52, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.005>
- ANA - Agência Nacional de Águas. **Coefficientes técnicos de uso da água para a agricultura irrigada**. 29 p. Brasília: ANA, 2019b.
- ANA - Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual**. 100p. Brasília: ANA, 2019a.
- ARAÚJO, W. L.; LACAVA, P. T.; MARCON, J.; LIMA, A. O. S.; SOBRAL, J. K.; PIZZIRANI-KLEINER, A. A.; AZEVEDO, J. L. Guia Prático: Isolamento e Caracterização de Microrganismos Endofíticos, **CALO**: Piracicaba, 2010.
- ATTI, S.; BONNELL, R.; PRASHER, S.; SMITH, D. L. Response of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] under chronic water deficit to Ico application during flowering and pod filling. **Irrigation and Drainage**, New Delhi, v. 54, p. 15-30, 2005.
- AZEVEDO, J.L. et al. Endophytic microorganisms: a review on insect control and recent advances on tropical plants. **Electronic Journal of Biotechnology**, Valparaíso, v. 3, n. 1, p. 40-65, 2000. Disponível em: <http://www.ejbiotechnology.info/index.php/ejbiotechnology/article/viewFile/v3n1-4/842>. Acesso em 30 Mar. 2018.
- BALL, J. Timothy; WOODROW, Ian E.; BERRY, Joseph A. A Model Predicting Stomatal Conductance and its Contribution to the Control of Photosynthesis under Different Environmental Conditions. **Progress In Photosynthesis Research**, p. 221-224, 1987. Springer Netherlands. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-0519-6_48.
- BÁRBARO, I. M.; CENTURION, M. A. P. C.; DI MAURO, A. O.; UNÊDA-TREVISOLI, S. H.; ARRIEL, N. H. C.; COSTA, M. M. Path analysis and expected response in indirect selection for grain yield in soybean. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 6, n. 2, p. 151-159, 2006.

- BARBOSA, L. A. **Limite crítico do potencial hídrico da soja durante os estádios vegetativo e reprodutivo**. 2017. 91f. (Dissertação de Mestrado), Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2017.
- BARBOUR, Margaret M.; TCHERKEZ, Guillaume; BICKFORD, Christopher P.; MAUVE, Caroline; LAMOTHE, Marlene; SINTON, Sarah; BROWN, Hamish. $\delta^{13}\text{C}$ of leaf-respired CO_2 reflects intrinsic water-use efficiency in barley. **Plant, Cell & Environment**, v. 34, n. 5, p. 792-799, 15 mar. 2011. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02282.x>.
- BARELLI, L. et al. Fungi with multifunctional lifestyles: endophytic insect pathogenic fungi. **Plant Molecular Biology**, Dordrecht, v. 90, n. 6, p. 657-664, Apr. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11103-015-0413-z>
- BARROS, A. C.; MONTEIRO, P. M. F. O. FURTADO, X. C.; JÚNIOR, J. N.; GUERZONI, R. A. Tolerância de cultivares de soja aos herbicidas imazaquin, diclosulam e sulfentrazone, aplicado sem solo de textura arenosa. **Revista Brasileira de Herbicidas**, Maringá, v. 4, p. 8, 2005.
- BASSOI, L. H.; CORREIA, J. S.; SANTOS, A. R. L.; SILVA, J. A.; COSTA, B. R. S. Deficit irrigation in grapevine cv. Syrah during two growing seasons in the Brazilian Semiarid. **Engenharia Agrícola**, v. 35, p. 430-441, 2015.
- BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; BERGONCI, J. I.; BIANCHI, C. A. M.; MULLER, A. G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 9, p. 831-839, set. 2004.
- BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2014. 84 p.
- BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; LEMPP, B.; SOUZA, C. M. A. de; SOUZA, F. R. de Anatomia radicular de milho em solo compactado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, p. 299-305, 2010.
- BERTOLLI, S. C.; RAPCHAN, G. L.; SOUZA, G. M. Photosynthetic limitations caused by different rates of water deficit induction in Glycine max and Vigna unguiculata. **Photosynthetica**, v. 50, p. 329-336, 2012.
- BITTENCOURT, V. R. E. P.; MASCARENHAS, A. G.; FACCINI, J. L. H. Mecanismo de infecção do fungo *Metarhizium anisopliae* no carrapato *Boophilus microplus* em condições experimentais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 29, n. 2, p. 351-354, Jun. 1999.
- BLANCO, F.F.; RIBEIRO, V.Q.; RIBEIRO, J.L.; NOGUEIRA, C.C.P.; VELOSO, M.E.C. Crescimento e produção de cultivares de algodão sob irrigação com déficit. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 8, 2011, São Paulo. Anais. Brasília: ABRAPA, 2011.
- BLUM, A. 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, n. 2-3, p. 119-123, jun. 2009. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2009.03.009>.
- BORDINGNON, J. R.; MANDARINO, J. M. G. **Soja: composição química, valor nutricional e sabor**. Londrina: EMBRAPA – CNPSo, 1994. 32p. (EMPRAPA-CNPSo. Documentos, 70).

- BORÉM, A. **Melhoramento de plantas**. 2ª edição, Viçosa: Editora UFV, 2000, 453p, BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Regras para Análise de Sementes. Brasília: DNDV/CLAV, 1992. 365p.
- BRANDALIZZE, V. Realidade e perspectivas de mercado e comercialização da soja no Brasil e no mundo. In: FANCELLI, A. L. **Soja: Condicionantes de alta produtividade**. Piracicaba: USP/ESALQ/LPV, 2017, P. 1-29.
- BU, L.; ZHANG, R.; HAN, M.; XUE, J.; CHANG, Y. **The physiological mechanism of compensation effect in maize leaf by re-watering after draught stress**. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, v. 18, n. 2, pp. 88-92, 2009.
- BURRIRO, U. A.; SAMOON, H. A.; OAD, F. C.; JAMRO, G. H. Crop Coefficient (kc) and Water Use Efficiency (WUE) of Soybean as Affected by Soil Moisture Stress and Fertility Levels. **Journal Of Applied Sciences**, v. 2, n. 12, p. 1096-1098, 15 nov. 2002.
- CÂMARA, G. M. S. Nitrogênio e produtividade da soja. In: CÂMARA, G. M. S. (Ed.). **Soja: tecnologia de produção II**. Piracicaba, SP: Esalq, 2000. P. 295-339.
- CANDOGAN, Burak Nazmi; SINCIK, Mehmet; BUYUKCANGAZ, Hakan; DEMIRTAS, Cigdem; GOKSOY, Abdurrahim Tanju; YAZGAN, Senih. 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, fev. 2013. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.021>.
- CASAGRANDE, E. C.; FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; OYA, T.; PEDROSO, J.; MARTINS, P. K.; BRETON, M. C.; NEPOMUCENO, A. L. Expressão gênica diferencial durante deficit hídrico em soja. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Lavras, v. 13, n. 2, p. 168-184, 2001.
- CASAROLI, D.; VAN LIER, Q.J. Critérios para determinação da capacidade de vaso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 7, p. 59-66, 2008.
- CATUCHI, T. A.; GUIDORIZZI, F. V. C.; GUIDORIZI, K. A.; BARBOSA, A. M.; SOUZA, G. M. Respostas fisiológicas de cultivares de soja a adubação potássica sob diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 47, n. 4, p. 519-527, 2012.
- CHAVARRIA, G., DURIGON, M.R., KLEIN, V.A., KLEBER, H.; Restrições fotossintéticas de plantas de soja sob variação de disponibilidade hídrica. **Ciências Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 8, p. 1387-1393, 2015.
- COMLEKCIOGLU, N.; SIMSEK, M. Effects of deficit irrigation on yield and yield components of vegetable soybean [Glycine max L. (Merr.)] in semi-arid conditions. **African Journal of Biotechnology**, v. 10, n. 33, p. 6227-6234, 2011.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 9, safra 2021/22, n. 6 sexto levantamento, março 2022.
- CONAB. 2019. **Observatório agrícola: acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Safra 2018/19, v.6, n.7, p.119.
- CONCENÇO, G.; PARFITT, J.M.B.; MOISINHO, I.S.; BUENO, M.V.; SILVA, J.T.; CONCENÇO, S.E. Rice yield components under water stress imposed at different growth stages. **Journal of Agricultural Science**, v.10, n.3, p. 290-297, 2018.

- COSTA, J. A. **Cultura da soja**. Porto Alegre: Evangraf, 1996. 233p. Dias, Henrique & Alcarde Alvares, Clayton & Sentelhas, Paulo. Um século de dados meteorológicos em Piracicaba, SP: Mudanças do clima pela classificação de Köppen. In: **XX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, 10., 2017, Juazeiro, BA.
- CORDÃO, M.A.; ARAÚJO, W.P.; PEREIRA, J.R.; ZONTA, J.H.; LIMA, R.P.; FERREIRA, F.N. Cultivares de algodoeiro herbáceo sob deficit hídrico aplicado em fases fenológicas. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 13, n. 3, p. 313-321, 2018.
- COX, W. J.; JOLIFF, G. D. Crop-water relations of sunflower and soybean under irrigation and dryland conditions. **Crop Science**, v. 27, p. 553-557, 1987.
- CUNHA, G. R.; BERGAMASCHI, H. Efeitos da disponibilidade hídrica sobre o rendimento das culturas. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, 1992. cap. 6, p. 85-97.
- DAI, H. Study of physiological mechanism on drought-wet change and compensative effect of crops. **Journal Anhui Agricultural Sciences**, v. 35, n. 32, p. 10222-10224, 2007.
- DEMIRTAS, Ç.; YAZGAN, S.; CANDOGAN, B. N.; SINCIK, M.; BUYUKCANGAZ, H.; GOKSOY, A. T. Quality and yield response of soybean (*Glycine max* L. Merrill) to drought stress in sub-humid environment. **African Journal Biotechnology**, v. 9, n. 41, p. 6873-6881, 2010.
- DIAS, H. A. A., CLAYTON; SENTELHAS, P. Um século de dados meteorológicos em Piracicaba, SP: Mudanças do clima pela classificação de Köppen. In: **XX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, 10., 2017, Juazeiro, BA.
- DONALD, C. M.; HAMBLIN, J. The biological yield and haverst index of cereals as agronomic an plant breeding criteria. **Advances in Agronomy**, v. 28, p. 361-405, 1976.
- DONG, Shoukun; JIANG, Yingze; DONG, Yuchen; WANG, Libin; WANG, Wenjia; MA, Zezhong; YAN, Chao; MA, Chunmei; LIU, Lijun. A study on soybean responses to drought stress and rehydration. **Saudi Journal Of Biological Sciences**, v. 26, n. 8, p. 2006-2017, dez. 2019. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.08.005>.
- DOORENBOS, L.; KASSAN, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campinas Grande: UFPB, 1994. 306p.
- ECK, H.V., MATHERS, A.C. & MUSICK, J.T. Plant water stress at various growth stages and growth and yield of soybean. **Field Crops Research**, v. 17, p. 1-16, 1987.
- EGLI, D. B.; BRUENING, W. P. Water stress, photosynthesis, seed sucrose levels and seed growth in soybean. **Journal of Agricultural Science**, Toronto, v. 142, p. 1-8, 2004.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologia de produção de soja – Região Central do Brasil 2012 e 2013**. Londrina, PR: Embrapa Soja, 2011. 264 p.
- EMBRAPA. Exigências climáticas. **Tecnologias de produção de soja – Paraná – 2003**. Londrina: Embrapa Soja, 2002. cap. 1, p. 28-30. (Sistemas de Produção, 2).
- ENGLISH, M.; NAVAIID, S. Perspectives on deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 32, p. 1-14. 1996.

- ESCUADERO, N.; LOPEZ-LLORCA, L. V. Effects on plant growth and root-knot nematode infection of an endophytic GFP transformant of the nematophagous fungus *Pochonia chlamydosporia*. **Symbiosis**, Amsterdam, v. 57, n. 1, p. 33-42, June 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13199-012-0173-3>
- ESPOSITO, E.; AZEVEDO, J. L.; Fungos uma introdução a biologia, bioquímica e biotecnologia, 2a. ed., **EDUCS**: Caxias do Sul, 2010.
- FAO** – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Progress on water-use efficiency – global baseline for SDG indicator 6.4.1. Rome: FAO, 24 Aug. 2018. 56 p.
- FARIAS, J. R. B.; ASSAD, E. D.; ALMEIDA, I. R.; EVANGELISTA, B. A.; LAZZAROTTO, C.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 415-421, 2001.
- FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 9 p. (Circular técnica, 48).
- FAROOQ, M.; WAHID, A.; KOBAYASHI, N.; FUJITA, D.; BASRA, S. M. A. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. **Agronomy for Sustainable Development**, Pakistan, v. 29, n. 1, p. 185-212, 2009.
- FARQUHAR, G D; SHARKEY, T D. Stomatal Conductance and Photosynthesis. **Annual Review Of Plant Physiology**, v. 33, n. 1, p. 317-345, jun. 1982.
- FEHR, W. R; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Iowa, Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1997. 12 p. (Special Report, 80).
- FEHR, W. R; CAVINESS, C. E.; GURMOOD, D. T.; PENNINGTON, J. S. Stage of development description for soybean, *Glycine max* (L.) Merrill. **Crop Science**, Madison, v. 11, n. 6, p. 929-931, 1971.
- FELISBERTO, G. **Caracterização de respostas morfológicas e fisiológicas de plantas de soja submetidas a estresse hídrico**. Dissertação (mestrado) Escola superior de agricultura, Luiz de Queiroz. Piracicaba, 2015. 85p.
- FIGLIORINI, S. L.; PIVETTA, L. G.; FANO, A.; MACHADO, F. R.; GUIMARÃES, V. F. Comportamento de genótipos de soja submetidos a déficit hídrico intenso em casa de vegetação. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 58, n. 3, p. 342-349, 2011.
- FIRÁKOVÁ, S., et al. Bioactive secondary metabolites produced by microorganisms associated with plants. **Biologia**, vol. 62, nº 3, Janeiro de 2007. doi:10.2478/s11756-007-0044-1.
- FLEXAS, J.; BOTA, J.; LORETO, F.; CORNIC, G.; SHARKEY, D. Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. **Plant Biology**, v. 6, p. 269-279. 2004.
- FLUMIGNAN, D. L., ALMEIDA, A. C. S., GARCIA, R. A. **Necessidade de Irrigação Complementar da Soja na Região Sul de Mato Grosso do Sul**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2015. 8p. (Circular Técnica, 34).
- FOLEGATTI, M. V.; SILVA, T. J. A.; CASARINI, E. O manejo da irrigação como elemento essencial na utilização racional dos recursos hídricos. In: THAME, 13 L. C. M. (Ed.). A cobrança pelo uso da água na agricultura. **Embu: Igual Editora**, p. 213-219, 2004.

- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. 2017. **FAOSTAT: Crop Productions**. Disponível: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>>. Acesso em: 20 jun. 2020.
- FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUZA, J. L. M.; ZOCOLER, J. L.; Funções de produção água-cultura. In: FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUZA, J. L. M.; ZOCOLER, J. L. (Ed.). **Planejamento de irrigação: análise e decisão de investimento**. Brasília-DF: Embrapa, 2005. P. 283-314.
- FULTON, A.; GRANT, J.; BUCHNER, R.; CONNELL, J. Using the pressure chamber for irrigation management in Walnut, Almond and Prune. **UC Peer Reviewed**. University of California. 2014.
- GAJIĆ, BOŠKO; KRESOVIĆ, BRANKA; TAPANAROVA, ANGELINA; ŠIVOTIĆ, LJUBOMIR; TODOROVIĆ, MLADEN. 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, nov. 2018. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.002>.
- GAO, Y.; DUAN, A.; SUN, J.; LI, F.; LIU, Z.; LIU, H.; LIU, Z. Crop coefficient and water-use efficiency of winter wheat/spring maize strip. Intercropping. **Field Crops Research**, v. 111, p. 65-73, 2009.
- GAO, Z.H.; CHEN, X. Y.; LUO, Y. P. Effects of rewatering during tillering stage after previous water stress on winter wheat root and shoot growth and their relations. **Agric. Res. Arid. Areas**, v. 25, p. 145-150, 2007.
- GARCIA, A. Garcia y; PERSSON, T.; GUERRA, L.C.; HOOGENBOOM, G. 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, jul. 2010. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2010.01.030>.
- GAVA, R.; FRIZZONE, J. A.; SNYDER, R. L.; JOSE, J. V.; FRAGA JUNIOR, E. F.; PERBONI, A. Estresse hídrico em diferentes fases da cultura da soja. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 9, n. 6, p. 349-259, 2015.
- GEERTS, S.; RAES, D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. **Agricultural Water Management**, v. 96, p. 1275-1284, 2009.
- GIANLUPPI, V. et al. **Cultivo de soja no cerrado de Roraima**. Sistema de Produção, Boa Vista: Embrapa Roraima, 2009.
- GILBERT, Matthew E.; ZWIENIECKI, Maciej A.; HOLBROOK, N. Michele. Independent variation in photosynthetic capacity and stomatal conductance leads to differences in intrinsic water use efficiency in 11 soybean genotypes before and during mild drought. **Journal Of Experimental Botany**, v. 62, n. 8, p. 2875-2887, 21 fev. 2011. <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/erq461>.
- GORNALL, J.; BETTS, R.; BURKE, E.; CLARK, R.; CAMP, J.; WILLET, K.; WILTSHIRE, A. Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, v. 365, p. 2973-2989, 2010.
- GORTHI, Apurupa; VOLENEC, Jeffrey J.; WELP, Lisa R. Stomatal response in soybean during drought improves leaf-scale and field-scale water use efficiencies. **Agricultural And Forest Meteorology**, v. 276-277, p. 107629, out. 2019.

- GUNATILAKA, A. A. Natural products from plant-associated microorganisms: distribution, structural diversity, bioactivity and implications of their occurrence. **Journal of Natural Products**, v. 69, n. 3, p. 509-526, 2006.
- GUNDEL, P. E.; MARTINEZ-GUERSAL, M. A.; BATISTA, W. B.; GHERSA, C. M. Dynamics of Neotyphodium endophyte infection in ageing seed pools: incidence of differential viability loss of endophyte, infected seed and non infected seed. **Annals of Applied Biology**, v. 156, n. 2 p. 199-209, 2010.
- HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Multivariate Data Analys.** 5.ed. New Jersey-USA: Prentice-Hall, 1998.
- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Economic consideration of deficit irrigation. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, v. 110, p. 343-358, 1984.
- HARPER, J. L. **Population biology of plants.** London: Academic Press, 1977.
- HARTLEY, S. E.; GANGE, A. C. Impacts of Plant Symbiotic Fungi on Insect Herbivores: Mutualism in a Multitrophic Context. **Annual Review of Entomology**, vol. 54, n. 1, p. 323-42. Jan. 2009. doi: 10.1146/annurev.ento.54.110807.090614
- HONNA, P. T.; FUGANTI-PAGLIARINI, R.; FERREIRA, L. C.; MOLINARI, M. D.; MARIN, S. R.; DE OLIVEIRA, M. C.; NAKASHIMA, K. Molecular, physiological, and agronomical characterization, in greenhouse and in field conditions, of soybean plants genetically modified with AtGols2 gene for drought tolerance. **Molecular breeding**, v. 36, n. 11, p. 157, 2016.
- HOSSAIN, MD MOKTER; LIU, XUEYI; QI, XUSHENG; LAM, HON-MING; ZHANG, JIANHUA. Differences between soybean genotypes in physiological response to sequential soil drying and rewetting. **The Crop Journal**, v. 2, n. 6, p. 366-380, dez. 2014.
- HUNGRIA, M.; CAMPO, R.J.; MENDES, I.C. **A importância do processo de fixação biológica do nitrogênio para a cultura da soja: componente essencial para a competitividade do produto brasileiro.** Londrina, Brasil, Embrapa Soja, 2007. 80 p. (Embrapa Soja. Documentos, 283).
- HYMOWITZ, J. R. On the domestication of the soybean. **Economic Botany**, v. 24, n. 4, p. 408-421, 1970.
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2018. **Summary for Policymakers.** In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.
- JABER, L. R.; ENKERLI, J. Effect of seed treatment duration on growth and colonization of *Vicia faba* by endophytic *Beauveria bassiana* and *Metarhizium brunneum*. **Biological control**, New York, v. 103, p. 187-195, Dec. 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2016.09.008>
- JALEEL, C. A.; MANIVANNAN, P.; WAHID, A.; FAROOQ, M.; AL-JUBURI, H. J.; SOMASUNDARAM, R.; PANNEERSELVAM, R. Drought stress in plants: A review on morphological characteristics and pigments composition. **International Journal of Agriculture & Biology**. v. 11, n. 1, p. 100-105, 2009.

- JIA, M.; CHEN, L.; XIN, H. L.; ZHENG, C. J.; RAHMAN, K.; HAN, T.; QIN, L. P. A. Friendly Relationship between Endophytic Fungi and Medicinal Plants. **Journal Frontier's in Microbiology**, v. 7, p. 907, 2016.
- JUMRANI, K.; BHATIA, V.S. Impact of combined stress of high temperature and water deficit on growth and seed yield of soybean. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 24, p. 37-50, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12298-017-0480-5>.
- KASTER, M.; FARIAS, J. R. B. **Regionalização dos testes de Valor de Cultivo e Uso e da indicação de cultivares de soja – Terceira Aproximação**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 69p. (Documentos, 330).
- KHAN, A. L.; HAMAYUN, M.; KHAN, S. A.; KANG, S.; SHINWARI, Z. K.; KAMRAN, M.; REHMAN, S.; KIM, J.; LEE, I. Pure culture of *Metarhizium anisopliae* LHL07 reprograms soybean to higher growth and mitigates salt stress. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 28, n. 4, p. 1483-1494, 2012.
- KHARWAR, R. N.; MISHRA, A.; GOND, S. K.; STIERLE, A.; STIERLE, D. Anticancer compounds derived from fungal endophytes: their importance and future challenges. **Natural Product Reports**, v. 28, p. 1208, 2011.
- KRON, A. P.; SOUZA, G. M.; RIBEIRO, R. V. Water deficiency at diferente developmental stages of Glycine max can improve drought tolerance. **Bragantia**, v. 67, n. 1, p. 43-49, 2008.
- KUDREV, T. G. **Água – Vida das plantas**. São Paulo: Cone, 1994. 178 p.
- KURIHARA, C. H. **Demanda de nutrientes pela soja e diagnose de seu estado nutricional**. 2004. 101 f. Tese (Doutor em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.
- KURIHARA, C. H.; VENEGAS, V. H. A.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F. de. Acúmulo de matéria seca e nutrientes em soja, como variável do potencial produtivo. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 60, n. 5, p. 690-698, set./out., 2013.
- KUSS, R. C. R.; KÖNIG, O.; DUTRA, L. M. C.; BELLÉ, R. A.; ROGGIA, S.; STURMER, G. R. Populações de plantas e estratégias de manejo de irrigação na cultura da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 1133-1137, 2008.
- LI, GUANG-HUI; WAN, YONG-SHAN; LIU, FENG-ZHEN; ZHANG, KUN. Photosynthetic characteristics in different peanut cultivars under conditions of drought and re-watering at seedling stage. **Chinese Journal Plant Ecology**, v. 38, n. 7, p. 729-739, 2014.
- LIAO, X. et al. The plant beneficial effects of *Metarhizium* species correlate with their association with roots. **Applied Genetics and Molecular Biotechnology**, Berlim, v. 98, n. 16, p. 7089-7096, May 2014. DOI: 10.1007/s00253-014-5788-2
- LIU, F.; ANDERSEN, M. N.; JACOBSEN, S-E.; JENSEN, C. Stomatal control and water use efficiency of soybean (*Glycine max* L. Merr.) during progressive soil drying. **Environmental and Experimental Botany**. Taastrup, Denmark, v. 54, p. 33-40, 2005.
- LIU, F.; STÜTZEL, H. Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to drought stress. **Scientia Horticulturae**, v.102, p.15-27, 2004.

- LIU, H.; ZHENG, W.; ZHENG, F.; WANG, L. Influence of rewatering on compensatory effect of maize seedling roots with diluted seawater irrigation. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, v. 28, n. 3. p. 101-106, 2012.
- LOPEZ, D. C.; SWORD, G. A. The endophytic fungal entomopathogens *Beauveria bassiana* and *Purpureocillium lilacinum* enhance the growth of cultivated cotton (*Gossypium hirsutum*) and negatively affect survival of the cotton bollworm (*Helicoverpa zea*). **Biological Control**, Orlando, 89, p. 53-60, 2015.
- MANAVALAN, L. P.; GUTTIKONDA, S. K.; TRAN, L. P.; NGUYEN, H. T. Physiological and Molecular Approaches to Improve Drought Resistance in Soybean. **Plant Cell Physiology**, Oxford, v. 50, n. 7, p. 1260-1276, 2009.
- MARCOS FILHO, J. Maturidade fisiológica de sementes de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 15, n. 4, p. 447-460, out., 1980.
- MARTÍNEZ-MEDINA, A. et al. Phytohormone Profiles induced by trichoderma isolates correspond with their biocontrol and plant growth-promoting activity on melon plants. **Journal of chemical ecology**, New York, v. 40, n. 7, p. 804-815, July 2014. DOI: 10.1007/s10886-014-0478-1
- MATTOS, E. C. et al. Estudo da identidade histológica de subprodutos de soja (*Glycine max* L.). **Revista Instituto Adolfo Lutz**, v. 74, p. 104-110, 2015.
- MCKINNON, A. C. et al. Detection of the Entomopathogenic Fungus *Beauveria bassiana* in the Rhizosphere of Wound-Stressed Zea mays Plants. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, n. 1161, p. 1-16, June 2018. DOI: 10.3389/fmicb.2018.01161.
- MEDRANO, H., TOMÁS, M., MARTORELL, S., FLEXAS, J., HERNÁNDEZ, E., ROSSELLÓ, J., POU, A., ESCALONA, J.M., BOTA, J., 2015. From leaf to whole-plant water use efficiency (WUE) in complex canopies: Limitations of leaf WUE as a selection target. **The Crop Journal**, v. 3, n. 3, p. 220–228, jun. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2015.04.002>
- MEYLING, N. V.; EILENBERG, J. Ecology of the entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* in temperate agroecosystems: potencial for conservation biological control. **Biological Control**, n. 43, p. 145-155, 2007.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. **Tabela de estádios de desenvolvimento da soja**. 2013. Disponível em:<http://agricultura.gov.br/arq_editor/file/vegetal/RegistroAutorizacoes/Formularios%20Prote%C3%A7%C3%A3o%20Cultivares/SOJA_ANEXO_I_EST%25C1DIOS_P.doc>.
- MUNDSTOCK, C. M. **Densidade de semeadura de milho para o Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 1977. 35 P. (Boletim Técnico).
- NEUMAIER, N.; NEPOMUCEN, A. L.; FARIAS, J. R. B.; OYA, T. Estádios de desenvolvimento da cultura da soja. In: BONATO, E. (Ed). **Estresses em soja**. [S.l.]: Embrapa, 2000. p. 21-44.
- OHASHI, Y.; NAKAYAMA, N.; SANEOKA, H.; FUJITA, K. Effects of drought stress on photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and stem diameter of soybean plants. **Biologia Plantarum**, v. 50, p. 138-141, 2006.

- OLIVEIRA, P. G. F. de; MOREIRA, O. da C.; BRANCO, L. M. C.; COSTA, R. N. T.; DIAS, C. N. Eficiência de uso dos fatores de produção água e potássio na cultura da melancia irrigada com água de reúso. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 2, p. 153-158, fev. 2012.
- PALHARINI, W. **Influência do estresse hídrico sobre caracteres agronômicos, fisiológicos e abertura de vagens imaturas em soja**. 2016. 36f. (Dissertação de Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, 2016.
- PAVA-RIPOLL, M. et al. The rhizosphere-competent entomopathogen *Metarhizium anisopliae* expresses a specific subset of genes in plant root exudate. **Microbiology**, London, v. 157, p. 47-55, Jan. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1099/mic.0.042200-0>.
- PEDERSEN, PALLE; LAUER, JOSEPH G. Response of Soybean Yield Components to Management System and Planting Date. **Agronomy Journal**, v. 96, n. 5, p. 1372-1381, set. 2004. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2004.1372>.
- PIMENTEL-GOMES, F. P.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais**. Piracicaba: Fealq, 2002. 309 p.
- PORCEL, R.; RUIZ-LOZANO, J. M. Arbuscular mycorrhizal influence on leaf water potential, solute accumulation and oxidative stress in soybean plants subjected to drought stress. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, p. 1743-1750, 2004.
- PUPPALA, N.; FOWLER, J. L.; JONES, T. L.; GUTSCHICK, V.; MURRAY, L. Evapotranspiration, yield, and water-use efficiency responses of *Lesquerella fendleri* at different growth stages. **Industrial Crops and Products**, v. 21, p. 33-47, 2005.
- RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.
- RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; THOMPSON, H. E.; BENSON, G. O. **How a soybean plant develops**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1997. 20 p. (Special Report, 53).
- RODRIGUEZ, R. J.; WHITE, J. F.; W, ARNOLD, A.E.; REDMAN, R. S. Fungal endophytes: diversity and functional roles. **New Phytologist**, v.182, n. 2, p. 314- 330, 2009.
- ROMERO-ROMERO, J. L.; INOSTROZA-BLANCHETEAU, C.; ORELLANA, D.; AQUEA, F.; REYES-DÍAZ, M.; GIL, P. M.; MATTE, J. P.; ARCE-JOHNSON, P. Stomata regulation by tissue-specific expression. Of the *Citrus sinensis* MYB61 transcription fator improves water-use efficiency in *Arabidopsis*. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 130, p. 54-60, set. 2018.
- SAAD, A. M. **O déficit de irrigação como estratégia de manejo da água em feijoeiro**. 1996. 147 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.
- SALISBURY, F. B.; ROSS, C. W. **Fisiologia das plantas**. Cengage Leming, São Paulo, ed. 4, p. 792, 2013.
- SANTOS, L. S. et al. A interação harmônica entre fungos e plantas: aspectos da relação endófito/hospedeiro. **SaBios-Revista de Saúde e Biologia**, v. 8, n. 1, p. 92-101, Jan./Abr. 2013.

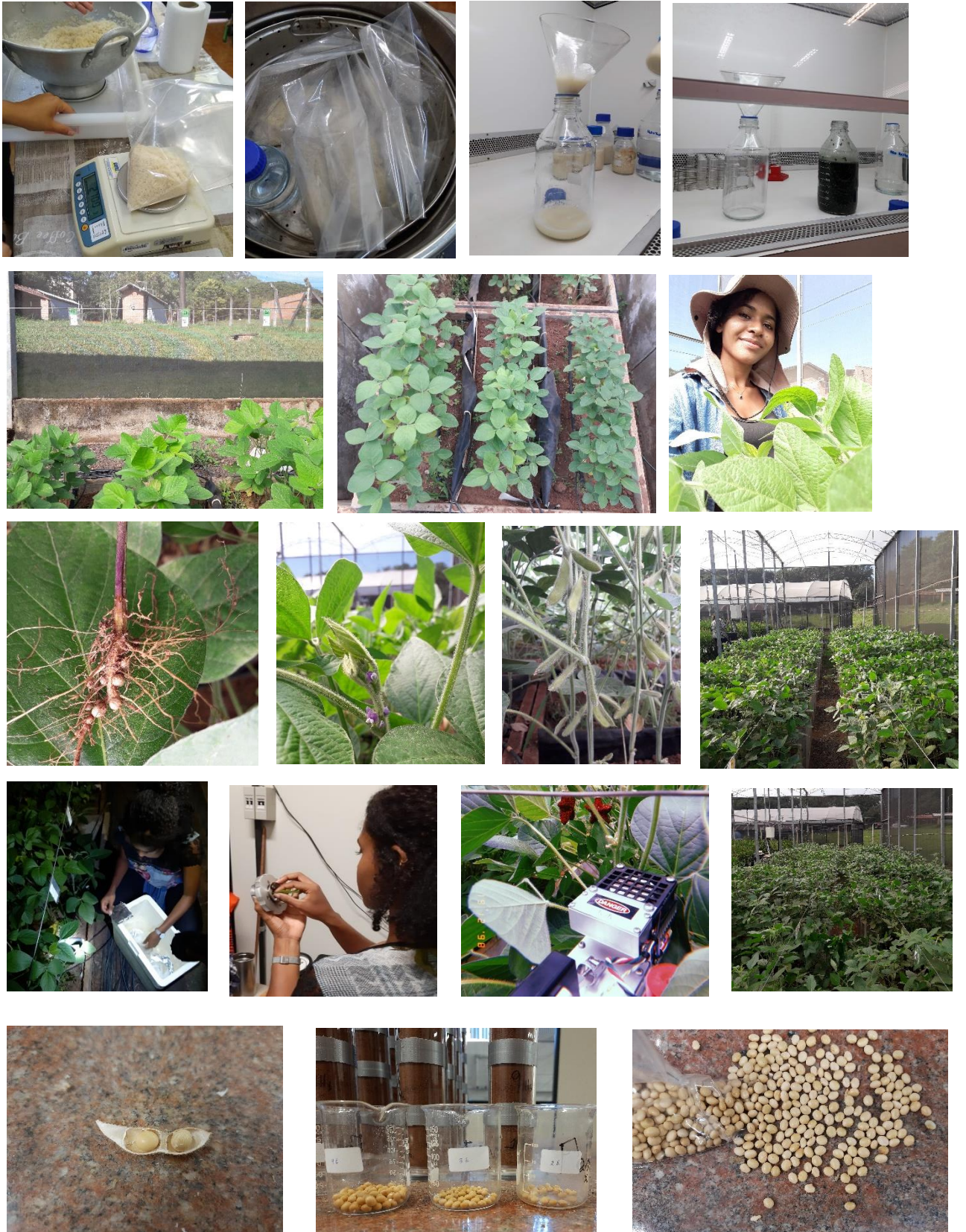
- SANTOS, M. P. de A. **Déficit hídrico em soja com tipo de crescimento semideterminado para a região do MATOPIBA**. 2018. 77 f. Dissertação (Mestre em Produção Vegetal) – Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Universidade Federal do Tocantins, Campus Universitário de Gurupi, Gurupi, 2018.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa, 5 ed. ver. Amp, 2018.
- SANTOS, T. T.; VARAVALHO, M. A. Aplicação de microrganismos endofíticos na agricultura e na produção de substâncias de interesse econômico. **Semina: Ciências Biológicas e da Saúde**, Londrina, v. 32, n. 2, p. 199-212, Dec. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0367.2011v32n2V99>.
- SCOFFONI, Christine; ALBUQUERQUE, Caetano; BRODERSEN, Craig R.; TOWNES, Shatara V.; JOHN, Grace P.; BARTLETT, Megan K.; BUCKLEY, Thomas N.; MCELDRONE, Andrew J.; SACK, Lawren. Outside-Xylem Vulnerability, Not Xylem Embolism, Controls Leaf Hydraulic Decline during Dehydration. **Plant Physiology**, v. 173, n. 2, p. 1197-1210, jan. 2017. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1104/pp.16.01643>.
- SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. (Ed.). **Soja: do plantio à colheita**. Viçosa, MG: UFV, 2015. 333 p.
- SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R. **Clima e produtividade da soja**. Efeitos nas produtividades potencial, atingível e real. Fundação MT – Boletim de Pesquisa 2015/2016, 2016. P. 20-44.
- SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G. M. S.; FARIAS, J. R. B.; NENDEL, C.; HAMPF, A. The soybean yield gap in Brazil: Magnitude, causes and possible solutions. **Journal of Agriculture Science**, v. 153, p. 1394-1411, 2015.
- SILVA, M. S.; NAVES, M. M. V.; OLIVEIRA, R. B.; LEITE, O. S. M. Composição química e valor protéico do resíduo de soja em relação ao grão de soja. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 26, p. 571-576, 2006a.
- SILVA, R. L. O.; LUZ, J. S.; SILVEIRA, E. B.; CAVALCANTE, U. M. T. Fungos endofíticos em *Annona* spp.: isolamento, caracterização enzimática e promoção do crescimento em mudas de pinha (*Annona squamosa* L.). **Acta Botânica Brasílica**, v. 20, n. 3, p. 649-655, 2006b.
- SILVEIRA, L.K.; PAVÃO, G.C.; SANTOS DIAS, C.T.; QUAGGIO, J.A.; PIRES, R.C.M. Deficit irrigation effect on fruit yield, quality and water use efficiency: A long-term study on Pêra-IAC sweet orange. **Agricultural Water Management**, v. 231, p. 106019, 2020.
- SIMÕES, W.L.; CALGARO, M.; GUIMARÃES, M.J.M.; OLIVEIRA, A.R.; PINHEIRO, M.P.M.A. Sugarcane crops with controlled water deficit in the Sub-middle São Francisco Valley, Brazil. **Revista Caatinga**, v. 31, n. 4, p. 963-971, 2018.
- SINCIK, M.; CANDOGAN, B. N.; DEMIRTAS, C.; BÜYÜKCANGAZ, H.; YAZGAN, S.; GÖKSOY, A. T. Deficit Irrigation of Soya Bean [*Glycine max* (L.) Merr.] in a Sub-humid Climate. **Journal Of Agronomy And Crop Science**, v. 194, n. 3, p. 200-205, jun. 2008. DOI <http://dx.doi.org/10.1111/j.1439-037x.2008.00307.x>.

- SINCLAIR, T. R.; PURCELL, L. C.; KING, C. A.; SNELLER, C. H.; CHEN, P.; VADEZ, V. Drought tolerance and yield increase of soybean resulting from improved symbiotic N₂ fixation. **Field Crops Research**, Akron, n. 101, p. 68-71, 2007.
- SOUSA, M. A.; LIMA, M. D. B., Influência da supressão da irrigação em estádios de desenvolvimento do feijoeiro CV. Carioca comum. **Bioscience Journal**, v. 26, n. 4 p. 550-557, 2010.
- SOUZA, M. S. de; ALVES, S. S. V.; DOMBROSKI, J. L. D.; FREITAS, J. D. B. de; AROUCHA, E. M. M. Comparação de métodos de mensuração de área foliar para a cultura da melancia. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 2, p. 241-245, abr./jun. 2012.
- ST. LEGER, R. J.; WANG, C.; FANG, W. New perspectives on insect pathogens. **Fungal Biology Reviews**, London, v. 25, n. 2, p. 84-88, July 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2011.04.005>.
- SUDHA, V. et al. Biological properties of Endophytic Fungi. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 59, p. 1-7, Maio 2016.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5.ed. Porto Alegre: Artemed, 2013. 954p.
- TIAGO, P. V.; OLIVEIRA, N. T. de; LIMA, E. Á. de L. A. Biological insect control using *Metarhizium anisopliae*: morphological, molecular, and ecological aspects. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 4, p. 645-651, Apr. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782014000400012>
- TULLOCH, M. The genus *Metarhizium*. **Transactions of the British Mycological Society**, Cambridge, v. 66, n. 3, p. 407-411, 1976.
- USDA, U. S. D. OF A. **World agricultural supply and demand estimates**. Washington, DC: The Department, 2022.
- VARONE, Laura; GRATANI, Loretta. Leaf respiration responsiveness to induced water stress in Mediterranean species. **Environmental and Experimental Botany**, v. 109, p. 141-150, jan. 2015. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.07.018>.
- VAZ BISNETA, M. **Influência do tipo de crescimento, época e densidade de semeadura em caracteres morfoagronômicos de cultivares de soja**. Dissertação, Universidade Federal de Goiás, UFG, Goiânia, p. 76, 2015.
- VEGA, F. E. Insect pathology and fungal endophytes. **Journal of Invertebrate Pathology**, Amsterdam, v. 98, p. 277-279, 2008.
- VILELA, G. F.; PEREIRA, M. J. Z.; KLEPKER, D.; MOREIRA, J. U. V.; VIEIRA, P. F. de M. J.; RABELO, C. F. S.; BEZERRA, J. W. T.; PEREIRA, F. A.; SILVA NETO, S. P. da. **Cultivares de soja: Macrorregiões 4 e 5 Norte e Nordeste do Brasil**. Londrina, PR: Embrapa Soja, 2016. 57p.
- VINHA, F. B. **Potencial da inoculação de fungos entomopatogênicos no plantio da soja para o manejo de pragas**. 2018. 96 f. Dissertação (Mestre em Ciências: Entomologia) – Programa de Pós-Graduação em Entomologia, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2018.
- WANG, C.; ST. LEGER, R. The MAD 1 Adhesion of *Metarhizium anisopliae* links adhesion with blasopore production and virulence to insects and MAD2 Adhesion enables attachment to plants. **Eukaryotic Cell**, Washington, v. 4, n. 5, p. 808-816, 2007.

- WAQAS, M., et al. Endophytic Fungi Produce Gibberellins and Indoleacetic Acid and Promotes Host-Plant Growth during Stress. **Molecules**, v. 17, n. 9, p. 10754-73. Set. 2012. doi: 10.3390/molecules170910754.
- YE, H.; ROORKIWAL, M.; VALLIYODAN, B.; ZHOU, L.; CHEN, P.; VARSHNEY, R.; NGUYEN, H. T. Genetic diversity of root system architecture in response to drought stress in grain legumes. **Journal of Experimental Botany**, v. 69, p. 3267–3277, 2018.
- YOO, Chan Yul; PENCE, Heather E.; HASEGAWA, Paul M.; MICKELBART, Michael V. Regulation of Transpiration to Improve Crop Water Use. **Critical Reviews In Plant Sciences**, v. 28, n. 6, p. 410-431, 4 nov. 2009. <http://dx.doi.org/10.1080/07352680903173175>.
- ZANON, A. J.; WINCK, M. J. E.; STRECK, N. A.; ROCHA, M. T. S.; CERA, C. J.; RICHTER, G. L.; LAGO, I.; SANTOS, M. P.; MACIEL, R. L.; GUEDES, C. J. V.; MARCHESAN, E. Desenvolvimento de cultivares de soja em função do grupo de maturação e tipo de crescimento em terras altas e terras baixas. **Bragantia**, v. 74, p. 400-411, 2015.
- ZHANG, H. W., et al. Biology and Chemistry of Endophytes. **Natural Product Reports**, v. 23, n. 5, p. 753, 2006. doi: 10.1039/b609472b.
- ZHANG, J.; LIU, J.; YANG, C.; DU, S.; YANG, W. Photosynthetic performance of soybean plants to water deficit under high and low light intensity. **South African Journal of Botany**, v. 105, p. 279-287, 2016.
- ZHOU, S. X.; PRENTICE, I. C.; MEDLYN, B. E. Bridging drought experiment and modeling: Representing the differential sensitivities of leaf gas exchange to drought. **Frontiers Plant Science**, v. 9, p. 1-12, 2019. DOI <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01965>
- ZILIO, M. **Crescimento e partição de biomassa de cultivares de soja submetida à restrição hídrica em diferentes estádios fenológicos**. Tese de Doutorado em Produção Vegetal, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2014.

APÊNDICES

APÊNDICE A. Imagens adicionais das atividades realizadas ao longo do experimento.



ANEXOS

ANEXO A. Resumo da análise de variância correspondente à altura de inserção do primeiro legume (AIPL) em função de manejos de irrigação e inoculantes, Piracicaba, SP, 2021.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Manejo (M)	8	66,25	8,3308	0,62717	0,74722 ^{ns}
Erro a	25	332,08	13,2831		
Inoculantes (F)	2	28,99	14,4949	1,03045	0,36955 ^{ns}
M x F	16	132,11	8,2570	0,58700	0,86813 ^{ns}
Erro b	29	407,93	14,0665		
Total	80	967,76			
CV1 (%)	17,40				
CV2 (%)	17,90				

Em que: * significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; FV - fator de variação; GL - grau de liberdade; SQ - soma de quadrado; QM - quadrado médio; ns - não significativo; CV - coeficiente de variação.

ANEXO B. Resumo da análise de variância correspondente à altura de plantas em função de manejos de irrigação e inoculantes, Piracicaba, SP, 2021.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Manejo (M)	8	8.089,4	1011,17	6,4910	0,00014*
Erro a	25	3.894,5	155,78		
Inoculantes (F)	2	93,7	46,87	0,7304	0,49037 ^{ns}
M x F	16	924,5	57,78	0,9005	0,57586 ^{ns}
Erro b	29	1.860,8	64,17		
Total	80	14.862,9			
CV1 (%)	12,34				
CV2 (%)	7,91				

Em que: * significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; FV - fator de variação; GL - grau de liberdade; SQ - soma de quadrado; QM - quadrado médio; ns - não significativo; CV - coeficiente de variação.

ANEXO C. Resumo da análise de variância correspondente ao diâmetro de caule em função de manejos de irrigação e inoculantes, Piracicaba, SP, 2021.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Manejo (M)	8	5,2493	0,65617	3,3929	0,008979*
Erro a	25	4,8348	0,19339		
Inoculantes (F)	2	0,2084	0,10422	1,1992	0,315954 ^{ns}
M x F	16	1,9040	0,11900	1,3693	0,224381 ^{ns}
Erro b	29	2,5204	0,08691		
Total	80	14,7169			
CV1 (%)	10,97				
CV2 (%)	7,35				

Em que: * significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; FV - fator de variação; GL - grau de liberdade; SQ - soma de quadrado; QM - quadrado médio; ns - não significativo; CV - coeficiente de variação.

ANEXO D. Resumo da análise de variância correspondente à eficiência do uso da água em função de manejos de irrigação e inoculantes, Piracicaba, SP, 2021.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Manejo (M)	8	1,7804	0,222551	4,7996	0,001155*
Erro a	25	1,1592	0,046368		
Inoculantes (F)	2	0,5556	0,277778	8,4701	0,001268*
M x F	16	1,8851	0,117821	3,5926	0,001360*
Erro b	29	0,9511	0,032795		
Total	80	6,3314			
CV1 (%)	21,36				
CV2 (%)	17,96				

Em que: * significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; FV - fator de variação; GL - grau de liberdade; SQ - soma de quadrado; QM - quadrado médio; ns - não significativo; CV - coeficiente de variação.

ANEXO E. Resumo da análise de variância correspondente ao índice de área foliar em função de manejos de irrigação e inoculantes, Piracicaba, SP, 2021.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Manejo (M)	8	67,049	8,3812	8,2058	2,1E-05*
Erro a	25	25,534	1,0214		
Inoculantes (F)	2	5,063	2,5313	3,1222	0,059152*
M x F	16	49,886	3,1179	3,8457	0,000805*
Erro b	29	23,512	0,8107		
Total	80	171,044			
CV1 (%)	17,37				
CV2 (%)	15,47				

Em que: * significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; FV - fator de variação; GL - grau de liberdade; SQ - soma de quadrado; QM - quadrado médio; ns - não significativo; CV - coeficiente de variação.

ANEXO E. Resumo da análise de variância correspondente ao índice de colheita em função de manejos de irrigação e inoculantes, Piracicaba, SP, 2021.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Manejo (M)	8	0,19336	0,024170	3,2768	0,010767*
Erro a	25	0,18440	0,007376		
Inoculantes (F)	2	0,06470	0,032349	6,3818	0,005049*
M x F	16	0,24492	0,015308	3,0199	0,004710*
Erro b	29	0,14700	0,005069		
Total	80	0,83439			
CV1 (%)	26,25				
CV2 (%)	21,76				

Em que: * significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; FV - fator de variação; GL - grau de liberdade; SQ - soma de quadrado; QM - quadrado médio; ns - não significativo; CV - coeficiente de variação.

ANEXO F. Resumo da análise de variância correspondente à massa de grãos por planta em função de manejos de irrigação e inoculantes, Piracicaba, SP, 2021.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Manejo (M)	8	91,87	11,4834	4,1304	0,002962*
Erro a	25	69,51	2,7802		
Inoculantes (F)	2	34,24	17,1213	9,7656	0,000572*
M x F	16	109,64	6,8522	3,9083	0,000708*
Erro b	29	50,84	1,7532		
Total	80	356,09			
CV1 (%)	22,16				
CV2 (%)	17,60				

Em que: * significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; FV - fator de variação; GL - grau de liberdade; SQ - soma de quadrado; QM - quadrado médio; ns - não significativo; CV - coeficiente de variação.

ANEXO G. Resumo da análise de variância correspondente ao número de vagens por planta em função de manejos de irrigação e inoculantes, Piracicaba, SP, 2021.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Manejo (M)	8	4975,3	621,92	19,0974	0,00000*
Erro a	25	814,1	32,57		
Inoculantes (F)	2	22,8	11,42	0,6601	0,52440 ^{ns}
M x F	16	1047,3	65,46	3,7819	0,00092*
Erro b	29	501,9	17,31		
Total	80	7361,5			
CV1 (%)	13,81				
CV2 (%)	10,07				

Em que: * significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; FV - fator de variação; GL - grau de liberdade; SQ - soma de quadrado; QM - quadrado médio; ns - não significativo; CV - coeficiente de variação.

ANEXO H. Resumo da análise de variância correspondente ao número de nós por planta em função de manejos de irrigação e inoculantes, Piracicaba, SP, 2021.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Manejo (M)	8	63,779	7,9724	3,3000	0,01038*
Erro a	25	60,397	2,4159		
Inoculantes (F)	2	3,031	1,5155	0,9747	0,38933 ^{ns}
M x F	16	24,499	1,5312	0,9848	0,49670 ^{ns}
Erro b	29	45,090	1,5548		
Total	80	196,795			
CV1 (%)	10,32				
CV2 (%)	8,28				

Em que: * significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; FV - fator de variação; GL - grau de liberdade; SQ - soma de quadrado; QM - quadrado médio; ns - não significativo; CV - coeficiente de variação.

ANEXO I. Resumo da análise de variância correspondente à massa de cem grãos em função de manejos de irrigação e inoculantes, Piracicaba, SP, 2021.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Manejo (M)	8	53,159	6,6448	3,07577	0,01481*
Erro a	25	54,009	2,1604		
Inoculantes (F)	2	7,262	3,6312	1,69674	0,20097 ^{ns}
M x F	16	32,814	2,0509	0,95829	0,52103 ^{ns}
Erro b	29	62,063	2,1401		
Total	80	209,307			
CV1 (%)	12,83				
CV2 (%)	12,77				

Em que: * significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; FV - fator de variação; GL - grau de liberdade; SQ - soma de quadrado; QM - quadrado médio; ns - não significativo; CV - coeficiente de variação.

ANEXO J. Resumo da análise de variância correspondente à produtividade por hectare em função de manejos de irrigação e inoculantes, Piracicaba, SP, 2021.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Manejo (M)	8	18.146.534	2.268.317	5,6934	0,001072*
Erro a	25	7.171.465	398.415		
Inoculantes (F)	2	6.763.983	3.381.991	7,3339	0,002129*
M x F	16	21.656.330	1.353.521	2,9351	0,003626*
Erro b	29	16.601.196	461.144		
Total	80	70.339.507			
CV1 (%)	18,87				
CV2 (%)	20,31				

Em que: * significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; FV - fator de variação; GL - grau de liberdade; SQ - soma de quadrado; QM - quadrado médio; ns - não significativo; CV - coeficiente de variação.

ANEXO K. Resumo da ANOVA de medidas repetidas correspondente à condutância estomática (gs) em função de manejos de irrigação e inoculantes com interação da época de mensuração, Piracicaba, SP, 2021.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Manejo (M)	8	18,8163	2,3520	32,4341	2,2 E ⁻¹⁶ *
Inoculantes (F)	2	0,1881	0,0940	1,2967	0,2766
Estádio (T)	1	6,7537	6,7537	93,1326	2,2 E ⁻¹⁶ *
M x F	16	4,3298	0,2706	3,7317	9,703 E ⁻⁰⁶ *
M x T	8	21,4459	2,6807	36,9668	2,2 E ⁻¹⁶ *
F x T	2	0,0695	0,0348	0,4793	0,6202
M x F x T	16	5,9741	0,3734	5,1488	2,026 E ⁻⁰⁸ *

Em que: * significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; FV - fator de variação; GL - grau de liberdade; SQ - soma de quadrado; QM - quadrado médio; ns - não significativo; CV - coeficiente de variação.

ANEXO L. Resumo da ANOVA de medidas repetidas correspondente à eficiência intrínseca do uso da água (*iEUA*) em função de manejos de irrigação e inoculantes com interação da época de mensuração, Piracicaba, SP, 2021.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Manejo (M)	8	598,15	74,768	36,8788	2,2 E ^{-16*}
Inoculantes (F)	2	9,15	4,574	2,2562	0,108483
Estádio (T)	1	17,35	17,353	8,5594	0,004003
M x F	16	114,68	7,168	3,5354	2,400 E ⁻⁰⁵
M x T	8	627,59	78,449	38,6944	2,2 E ^{-16*}
F x T	2	2,47	1,237	0,6100	0,544757
M x F x T	16	125,47	7,842	3,8678	5,588 E ⁻⁰⁶

Em que: * significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; FV - fator de variação; GL - grau de liberdade; SQ - soma de quadrado; QM - quadrado médio; ns - não significativo; CV - coeficiente de variação.

ANEXO M. Resumo da ANOVA de medidas repetidas correspondente ao potencial hídrico foliar (*PHP*) em função de manejos de irrigação e inoculantes com interação da época de mensuração, Piracicaba, SP, 2021.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Manejo (M)	8	0,9605	0,1201	6,4254	4,063 E ^{-07*}
Inoculantes (F)	2	0,0259	0,0130	0,6938	0,501335
Estádio (T)	1	4,5656	4,5656	244,3489	2,2 E ^{-16*}
M x F	16	1,2313	0,0770	4,1186	1,865 E ^{-06*}
M x T	8	0,8716	0,1090	5,8311	1,938 E ^{-06*}
F x T	2	0,0622	0,0311	1,6646	0,192940
M x F x T	16	0,6607	0,0413	2,2102	0,007189*

Em que: * significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; FV - fator de variação; GL - grau de liberdade; SQ - soma de quadrado; QM - quadrado médio; ns - não significativo; CV - coeficiente de variação.

ANEXO N. Resumo da ANOVA de medidas repetidas correspondente à taxa fotossintética líquida (*A*) em função de manejos de irrigação e inoculantes com interação da época de mensuração, Piracicaba, SP, 2021.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Manejo (M)	8	2403,79	300,47	20,2296	2,2 E ^{-16*}
Inoculantes (F)	2	66,87	33,44	2,2511	0,1089375
Estádio (T)	1	1030,00	1030,00	69,3454	5,662e-14
M x F	16	551,83	34,49	2,3220	0,0044651
M x T	8	3015,74	376,97	25,3795	2,2 E ^{-16*}
F x T	2	40,90	20,45	1,3769	0,2556220
M x F x T	16	740,66	46,29	3,1166	0,0001457

Em que: * significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; FV - fator de variação; GL - grau de liberdade; SQ - soma de quadrado; QM - quadrado médio; ns - não significativo; CV - coeficiente de variação.

ANEXO O. Resumo da ANOVA de medidas repetidas correspondente à transpiração (*E*) em função de manejos de irrigação e inoculantes com interação da época de mensuração, Piracicaba, SP, 2021.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Manejo (M)	8	666,76	83,345	29,3153	2,2 E ^{-16*}
Inoculantes (F)	2	11,98	5,990	2,1070	0,1253809
Estádio (T)	1	64,56	64,555	22,7062	0,0031263
M x F	16	143,04	8,940	3,1446	0,0001329
M x T	8	713,68	89,209	31,3779	2,2 E ^{-16*}
F x T	2	2,07	1,036	0,3646	0,6951531
M x F x T	16	193,77	12,110	4,2597	1,007e-06

Em que: * significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; FV - fator de variação; GL - grau de liberdade; SQ - soma de quadrado; QM - quadrado médio; ns - não significativo; CV - coeficiente de variação.