



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

**VALIDAÇÃO DE SENSORES E AVALIAÇÕES FISIOLÓGICAS EM
SOJA SUPRIDA COM POLÍMERO SUPERABSORVENTE E PÓ DE
ROCHA SOB REGIMES HÍDRICOS VARIÁVEIS**

LUCAS FELISBERTO PEREIRA

TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

BRASÍLIA/DF

JULHO/2020

000/1º20

L.F. PEREIRA – DOUTOR - 2020



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

**VALIDAÇÃO DE SENSORES E AVALIAÇÕES FISIOLÓGICAS EM
SOJA SUPRIDA COM POLÍMERO SUPERABSORVENTE E PÓ DE
ROCHA SOB REGIMES HÍDRICOS VARIÁVEIS**

LUCAS FELISBERTO PEREIRA

ORIENTADORA: MARIA LUCRÉCIA GEROSA RAMOS

CO-ORIENTADOR: WALTER QUADROS RIBEIRO JUNIOR

TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

PUBLICAÇÃO: 000/2020

BRASÍLIA/DF

JULHO/2020



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

**VALIDAÇÃO DE SENSORES E AVALIAÇÕES FISIOLÓGICAS EM
SOJA SUPRIDA COM POLÍMERO SUPERABSORVENTE E PÓ DE
ROCHA SOB REGIMES HÍDRICOS VARIÁVEIS**

LUCAS FELISBERTO PEREIRA

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

APROVADA POR:

**Maria Lucrécia Gerosa Ramos, Dra (Orientadora) / Universidade de Brasília /
lucrecia@unb.br**

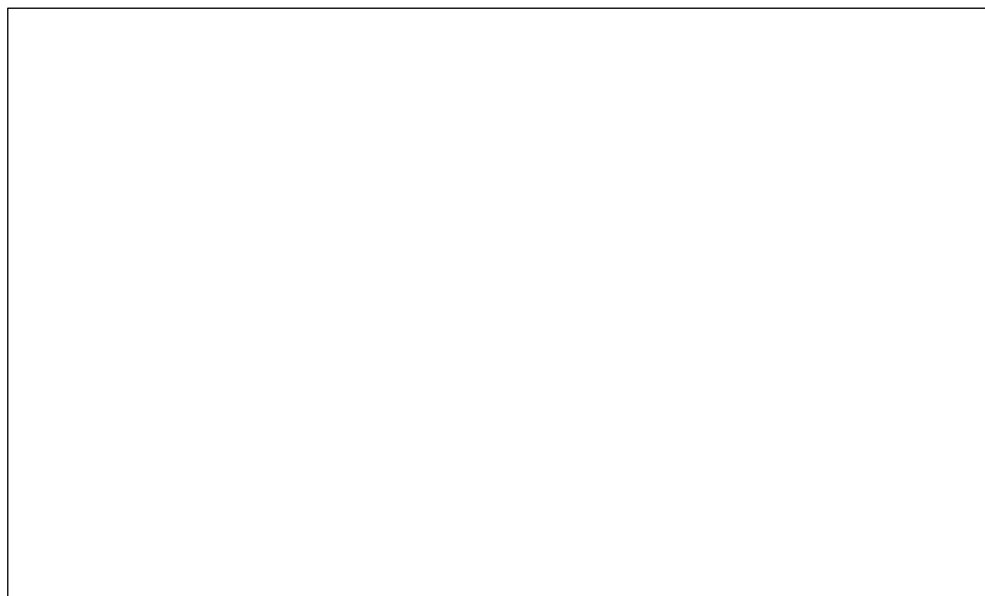
**Fábio Gelape Faleiro, Dr. (Membro Interno) / Embrapa Cerrados /
fabio.faleiro@embrapa.br**

**Thomas Christopher Rhys Williams, Dr. (Membro Externo) / Universidade de Brasília /
tcwilliams@unb.br**

**Samuel Cordeiro Vitor Martins, Dr. (Membro Externo) / Universidade Federal de Viçosa
/ samuel.martins@ufv.br**

BRASÍLIA, 15 de JULHO de 2020

FICHA CATALOGRÁFICA



REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PEREIRA, L.F. **Validação de sensores e avaliações fisiológicas em soja suprida com polímero superabsorvente e pó de rocha sob regimes hídricos variáveis.** Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2020, 153p. Tese de Doutorado.

NOME DO AUTOR: LUCAS FELISBERTO PEREIRA

TÍTULO DA TESE: Validação de sensores e avaliações fisiológicas de soja suprida com polímero superabsorvente e pó de rocha submetida ao déficit hídrico.

GRAU: Doutor **ANO:** 2020.

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

Nome: Lucas Felisberto Pereira

CPF: 082905446-42. Cel: +55 62 996028618. E-mail: lucas.felisberto@ifgoiano.edu.br

Endereço: Ervália, rua José de Freitas Santos, número 235, apartamento 102, CEP 36555000.

*A minha esposa Lorena,
pelo amor, paciência e
companheirismo.*

DEDICO

*Aos meus pais, Geremias
e Aparecida, irmãos Marcos e
Thamires e meus sogros,
Margarete e Márcio.*

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, não posso deixar de agradecer a Deus por mais esta etapa concluída e pelo fato de que Ele esteve presente em cada instante de meu trabalho. Deixo aqui o meu carinho especial a minha esposa Lorena, que não negou esforços para que tudo corresse bem, sendo ela, uma participante ativa da execução de muitas análises e avaliações no campo. Agradeço também a educação recebida pelos meus pais Jeremias de Magalhães Pereira e Aparecida Felisberto Pereira, pelas inúmeras orações e por todo auxílio durante meu processo de formação. Aos meus irmãos Thamires e Marcos Vinícios também deixo aqui meus sinceros agradecimentos pelo amor, por não deixarem a distância nos separar e pelas inúmeras orações. Também agradeço aos meus sogros Márcio e Margarete e meus cunhados Vinícios e Kelly pela atenção, presteza e por suas orações.

A Dr^a. Cristiane Andréa de Lima Guimarães, Daiane e Guilherme Filgueiras Soares, que tornaram o processo de doutoramento agradável e divertido. Essas três pessoas em especial trouxeram um pouco mais de alegria em momentos difíceis e complicados, depositaram fé em nosso trabalho, e contribuíram muito além do que elas imaginam. Tornaram-se muito mais que um grupo unido, mas uma família do trabalho, pessoas que quando saíamos de casa ansiávamos para vê-los e certamente existia e sempre existirá uma alegria muito especial em meu coração a cada vez em que reencontrá-los.

Registro aqui meus sinceros agradecimentos a todos os funcionários da Embrapa Cerrados, em especial, Alberto (Beto), José Reis (Zé Reis) e Juaci que representam o melhor que esta grande instituição pode oferecer, a vocês e a todos amigos da Embrapa Cerrados que dedicaram seu tempo e esforço para que este trabalho fosse concluído, o meu muito obrigado! Aproveito para a oportunidade para também agradecer a Embrapa Cerrados por ter aberto as portas e possibilitado a execução deste trabalho. Em especial agradeço a meu co-orientador, Dr.

Walter Quadros Ribeiro Junior que certamente me tornou um profissional melhor, pela sua garra, profissionalismo, respeito e paciência durante todo este período de doutoramento.

Agradeço a Universidade de Brasília (UnB) e a todos integrantes de seu Programa de Pós-graduação em Agronomia, pela presteza em tratar todos os assuntos relacionados a minha tese, ao secretário Guilherme, excelente profissional deixo aqui meus agradecimentos. Agradeço aos pesquisadores do instituto de pesquisa Max Planck de Jülich, Alemanha, Onno Muller, Uwe Rasher, Beat Keller e Nicoas Zendonadi, pela presteza e confiança. E agradeço a minha orientadora, Prof^a. Maria Lucrecia Gerosa Ramos, foram quatro anos e meio de duros trabalhos de campo, redação de trabalhos, muito aprendizado e todos esses momentos ela esteve presente, não faltou sua ajuda, sua disponibilidade e atenção, deixo aqui meu muitíssimo obrigado, certamente vou levar sua seriedade, profissionalismo e amor ao trabalho como exemplo por toda vida. Ao Dr. Walter Quadros Ribeiro Júnior, o que dizer de uma pessoa que foi como um pai durante todo este tempo, tudo o que pôde fazer para que pudéssemos chegar a este momento, certamente o fez, é meu exemplo de que o respeito e a admiração se adquirem com atitudes e virtudes, que somente pessoas honrosas o possuem.

Agradeço a meus amigos Professores Ítalo, Valdeir e Cássio por todo suporte durante este período. Deixo aqui meus agradecimentos ao Instituto Federal Goiano – *Campus Posse*, pelo financiamento de todo este processo, sinto-me honrado em “voltar para casa” com o sentimento de dever cumprido, mas certamente não o faria sem todo o suporte que esta magnífica instituição concede aos seus servidores, muito obrigado IF Goiano, levar-te-ei em meu coração por toda minha vida. A todos que direta e indiretamente participaram deste trabalho, meus agradecimentos!

**VALIDAÇÃO DE SENSORES E AVALIAÇÕES FISIOLÓGICAS EM SOJA
SUPRIDA COM POLÍMERO SUPERABSORVENTE E PÓ DE ROCHA
SUBMETIDA AO DÉFICIT HÍDRICO**

RESUMO GERAL

O clima é um dos fatores de maior importância no contexto agrícola, principalmente pelo simples fato de ser incontornável. Nesse contexto, o uso de novas tecnologias que permitam mitigar os efeitos da seca e ainda, a seleção eficiente de materiais geneticamente superiores em relação à tolerância seca é de suma importância. Neste trabalho, objetivou-se (1) validar sensores fisiológicos de fluorescência e espectrais, (2) avaliar o uso de polímero retentor de água em soja (*Glycine max*) e (3) verificar os impactos fisiológicos do uso de pó de rocha na cultura da soja submetida à seca durante seu período reprodutivo. Os experimentos foram conduzidos na Embrapa Cerrados, Planaltina-DF, em delineamento de blocos casualizados (DBC) em esquema de parcelas subdivididas com pelo menos 3 repetições em três anos (2016, 2017 e 2018). Foram utilizadas as cultivares de soja BRS 5980IPRO, NA 5909RG e BRS7280 nos diferentes experimentos. Foram delimitados quatro regimes hídricos (RH1, RH2, RH3 e RH4), sendo o RH1 o menos irrigado e o RH4, o mais irrigado. As variáveis resposta mensuradas com o analisador de gases a infra-vermelho foram: fotossíntese (A), condutância estomática (g_s), transpiração (E), rendimento máximo do fotossistema dois (FSII) (F_v/F_m) e rendimento quântico efetivo do FSII e rendimento quântico (F_v'/F_m' e Φ FSII). Foram realizadas medições de fluorescência da clorofila a a saber: F_q'/F_m' e ETR pela fluorescência transiente induzida a luz (LIFT) e de índices de vegetação como NDVI e PRI por um sensor hiperespectral abarcado no equipamento LIFT. Componentes produtivos como peso de mil grãos (PMG), número de vagens (NV), número de entre-nós (NEN), diâmetro do coleto (D), altura da planta (H) e produtividade também foram mensurados. De forma similar, em todos os anos avaliados, houve resposta do regime hídrico (RH) para todas variáveis. No ano de 2016, o emprego do LIFT para a fenotipagem apresentou resultados promissores, tanto a fluorescência quanto os índices de vegetação contribuíram para explicar as respostas produtivas durante a seca e ainda, para diferenciação das cultivares com coeficientes de correlação linear de Pearson fortes a muito fortes. Nos anos 2016 e 2017, o suprimento de polímero, proporcionou diferenças na produtividade somente no segundo ano, os incrementos no rendimento de grãos foram na ordem de 40% e puderam ser explicados pelo maior potencial do metabolismo fotossintético em condições de irrigação plena e em situações de déficit hídrico moderado, em situações de secas severas o efeito foi negativo. Nos anos de 2017 e 2018, o tratamento com mixa xisto (FMX) não proporcionou resposta positiva significativa ao metabolismo fotossintético, mas ainda é necessário o estudo de seu papel no longo prazo; os regimes hídricos impactaram as fases fenológicas estudadas. Conclui-se que novas tecnologias como o uso de sensores espectrais e de fluorescência podem ser aplicáveis à fenotipagem em larga escala. Ainda, o papel de condicionantes do solo, como polímeros e pó de rochas pode ser impactante na produtividade no médio e longo prazo, mas pode depender do tempo de aplicação, efeito residual e ainda, aplicações sucessivas.

Palavras –chave: Déficit hídrico, fenotipagem, condicionantes de solo, trocas gasosas

VALIDATION OF SENSORS AND PHYSIOLOGICAL EVALUATIONS IN SOYBEAN SUPPLIED WITH SUPERABSORBENT POLYMER AND ROCK POWDER SUBMITTED OF WATER DEFICIT

ABSTRACT

The climate is the most important factor in the agricultural context, simply because it is uncontrollable. In this context, the use of new technologies to mitigate the effects of drought and the efficient selection of genotypically superior materials in relation to drought tolerance is of paramount importance. In this work, the objective was (1) to validate physiological fluorescence and spectral sensors, (2) to evaluate the use of water-retaining polymer in soy (*Glycine max*) and (3) to verify the physiological impacts of the use of rock dust in the culture of soybean submitted to drought during its reproductive period. The experiments were conducted at Embrapa Cerrados, Planaltina-DF, in a randomized block design (RBD) in a split plot scheme with at least 3 replicates in three years (2016, 2017 and 2018). The soybean cultivars BRS 5980IPRO, NA 5909RG and BRS7280 were used in the different experiments. Four water regimes (WR) were defined (WR1, WR2, WR3 and WR4), with WR1 the least irrigated and WR4 the most irrigated. The response variables measured with the infrared gas analyzer were: photosynthesis (A), stomatal conductance (g_s), transpiration (E), maximum yield of photosystem two (PSII) (F_v/F_m) and effective quantum yield of PSII and quantum yield (F_v'/F_m' and Φ PSII). Chlorophyll fluorescence measurements were made, namely: F_q'/F_m' ETR by light-induced transient fluorescence (LIFT) and vegetation indices such as normalized difference vegetation index (NDVI) and photochemical reflectance index (PRI) by a hyperspectral sensor included in the LIFT equipment. Productive components such as weight of a thousand grains (WTG), number of pods (NP), number of nodes (NN), stem diameter (SD), plant height (PH) and productivity were also measured. Similarly, in all the years evaluated, there was a response from the water regime (WR) for all variables. In 2016, the use of LIFT for phenotyping showed promising results, both fluorescence and vegetation indices contributed to explain productive responses during drought and also to differentiate cultivars with strong to very long Pearson correlation coefficients strong. In the years 2016 and 2017, the supply of polymer provided differences in productivity only in the second year, the increases in grain yield were in the order of 40% and could be explained by the greater potential of photosynthetic metabolism under conditions of full irrigation and in situations of moderate water deficit, in severe drought situations the effect was negative. In the years 2017 and 2018, treatment with shale mixa (FMX) did not provide a significant positive response to photosynthetic metabolism, but it is still necessary to study its role in the long term; the water regimes impacted the studied phenological phases. It is concluded that new technologies such as the use of spectral and fluorescence sensors may be applicable to large-scale phenotyping. In addition, the role of soil conditioning agents, such as polymers and rock dust, can have an impact on productivity in the medium and long term, but may depend on the application time, residual effect and successive applications.

Keywords: water deficit, phenotyping, physiology, conditioning and soy.

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

- Tabela 1.** Análise de solo na área experimental no ano de 2016 nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm..... 86
- Tabela 2.** Assimilação Líquida de CO₂ (*A*) (μmol CO₂ m⁻²s⁻¹), Condutância estomática (*g_s*) (mol H₂O m⁻²s⁻¹), Concentração interna de CO₂ (*C_i*) (μmol CO₂ m⁻²) e Transpiração (*E*) (mmol H₂O m⁻²s⁻¹), em três cultivares de soja sob 4 regimes hídricos (RH)... 86
- Tabela 3.** Rendimento Quântico Máximo do Fotossistema II (*F_v/F_m*), Rendimento Quântico Efetivo do Fotossistema II (*F_v'/F_m'* e Φ FSII), Taxa de Transporte de Elétrons (*ETR_I*), Quenching de Extinção Fotoquímica (*qP*), Quenching de Extinção Não-Fotoquímica (*qN* e NPQ) em três cultivares de soja sob 4 regimes hídricos (RH). 87
- Tabela 4.** Densidade de Grãos (*DG* - Kg m⁻³), Peso de Mil Grãos (*PMG*) (g), Número de Vagens (*NV* – *NV* planta⁻¹), Número de Entre-Nós (*NEN* - *NEN* planta⁻¹), Diâmetro do Coleto (*D*) (Kg m⁻³), Altura (*H* – cm) e Produtividade (Kg ha⁻¹) em três cultivares de soja sob 4 regimes hídricos (RH). 88
- Tabela 5.** Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Índice Fotoquímico de Reflectância (*PRI*), Taxa de Transporte de Elétrons medida pelo LIFT (*ETR_L*) e Rendimento Quântico Efetivo do Fotossistema II (*F_q'/F_m'*) em três cultivares de soja sob 4 regimes hídricos (RH)..... 89
- Tabela 6.** Eficiência no Uso da Água (Water Use Efficiency - *WUE*) (μmol de CO₂ mol⁻¹ H₂O), Eficiência Intrínseca no Uso da Água (Intrinsic Water Use Efficiency - *iWUE*) (μmol de CO₂ mol⁻¹ H₂O), Potencial hídrico da ante-manhã (ψ_w) (MPa) e Conteúdo de prolina nas folhas (Prolina) (μmol g⁻¹ PF) em três cultivares de soja sob 4 regimes hídricos (RH). 89

CAPÍTULO II

- Tabela 1.** Análise do solo na área experimental nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm. 119
- Tabela 2.** Assimilação Líquida de CO₂ (*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*) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Rendimento Quântico Máximo do Fotossistema II (FSII) (F_v/F_m) e Rendimento Quântico Efetivo do FSII (F_v'/F_m') de três cultivares de soja, com e sem adição de polímero ao solo no ano de 2016. 119
- Tabela 3.** Fotossíntese (*A*) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Condutância Estomática (*g_s*) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e Transpiração (*E*) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) em três estágios fenológicos de cultivares de soja para tratamentos Controle e Polímero. 120
- Tabela 4.** Rendimento Quântico Efetivo do Fotossistema II (ΦPSII) e Taxa de Transporte de Elétrons (ETR) em três estágios fenológicos de cultivares de soja e tratamentos de controle e polímero. 121

CAPÍTULO III

- Tabela 1.** Análise do solo antes e após dois anos de implementação do experimento com remineralizadore de solo a uma profundidade de 0-20 cm. 147
- Tabela 2.** Produtividade (Kg/ha) da soja nos anos de 2017 e 2018. para os tratamentos de fertilização FMX, NPK e Controle, e regimes hídricos RH1, RH2, RH3 e RH4, nos invernos de 2017 e 2018. 147
- Tabela 3.** Fotossíntese Líquida (*A*) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Condutância Estomática (*g_s*) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Concentração Interna de CO₂ (*C_i*) ($\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}$), Taxa de Transpiração (*E*) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Rendimento Quântico Efetivo do Fotossistema dois (FSII)

(F_v/F_m'), Rendimento do FII (Φ_{FSII}) e Taxa de Transporte de Elétrons (ETR) em três fases fenológicas (R4, R5.1 e R5.5) para os tratamentos de fertilização FMX, NPK e Controle, e regimes hídricos RH1, RH2, RH3 e RH4, no inverno de 2017..... 148

Tabela 4. Fotossíntese (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Condutância Estomática (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e Transpiração (E) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) em quatro períodos de avaliação da soja, para os tratamentos de fertilização FMX, NPK e Controle, e regimes hídricos RH1, RH2, RH3 e RH4, no inverno de 2018.. 149

Tabela 5. Altura da planta (AP) (cm), Número de Vagens (NV), Número de Entre-Nós (NI), Diâmetro do Coleto (D) (mm) e Peso de Mil Grãos (PMG) (g) de soja para os tratamentos de fertilização FMX, NPK e Controle, e regimes hídricos RH1, RH2, RH3 e RH4, avaliados durante 10 dias de privação de água no inverno de água no inverno de 2018 e regimes hídricos RH1, RH2, RH3 e RH4, no inverno de 2017. 150

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1. Precipitação, Umidade relativa média (Urmed), Temperatura máxima, Temperatura mínima e Temperatura mínima no ano de 2016. As setas vermelhas indicam as datas em que ocorreram a semeadura, o período de irrigação uniforme, a fase fenológica de análise e a colheita. 90

Figura 2. Umidade do solo em oito pontos, com intervalos de 2 metros entre cada ponto. Quadrados cheios representam a umidade na profundidade de 0-20 cm e círculos cheios, de 20-40 cm, com R2 de 0,97 e 0,95, respectivamente..... 90

Figura 3. Volume de irrigação acumulado aplicado na cultura da soja durante a estação de seca em 2016. 91

Figura 4. Análise da correlação linear de Pearson com 5% de significância entre as variáveis Assimilação Líquida de CO₂ (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Condutância Estomática (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Concentração Interna de Carbono (C_i) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}$), Transpiração (E) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Peso de Mil Grãos (PMG) (g), Número de Vagens (NV), Número de Entre Nós (NEN), Diâmetro (D) (mm), Altura (H) (cm), Densidade de Grãos (DG) (Kg m^{-3}), Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Taxa de Transporte de Elétrons (LIFT) (ETR), Taxa de Transporte de Elétrons (IRGA) (ETR_1), Índice Fotoquímico de Reflectância (PRI), Rendimento Quântico Efetivo do Fotossistema II (F_q'/F_m' ; F1), Rendimento Quântico Efetivo do Fotossistema II (Φ_{FSII} e $F_v'/F_m'_{\text{IRGA}}$; F2), Rendimento Quântico Máximo do Fotossistema II (F_v/F_m_{IRGA} ; F3), Eficiência Instantânea (WUE) ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$) e Intrínseca (iWUE) ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$) no uso da água, *Quenching* de Extinção Fotoquímica (qP) e Não Fotoquímica (qN e NPQ)..... 92

Figura 5. Análise de Componentes principais (ACP) para as variáveis Assimilação Líquida de CO₂ (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Condutância Estomática (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Concentração Interna de Carbono (C_i) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}$), Transpiração (E) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Peso de Mil Grãos (PMG) ($\text{g } 1000\text{g}^{-1}$ de grãos), Número de Vagens (NV), Número de Entre Nós (NEN), Diâmetro do Coleto (D) (mm), Altura (H) (cm), Densidade de Grãos (DG) (Kg m^{-3}), Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Taxa de Transporte de Elétrons (LIFT) (ETR), Taxa de Transporte de Elétrons (IRGA) (ETR_1), Índice Fotoquímico de Reflectância (PRI), Rendimento Quântico Efetivo do Fotossistema II (F_q'/F_m' ; F1), Rendimento Quântico Efetivo do Fotossistema II (Φ_{FSII} e $F_v'/F_m'_{\text{IRGA}}$; F2), Rendimento Quântico Máximo do Fotossistema II (F_v/F_m_{IRGA} ; F3), Eficiência Instantânea (WUE) ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$) e Intrínseca (iWUE) ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$) no uso da Água, *Quenching* de

Extinção Fotoquímica (qP) e não Fotoquímica (qN e NPQ). Valores percentuais de contribuições das principais variáveis resposta. 93

CAPÍTULO II

- Figura 1.** Temperaturas máxima e mínima, precipitação e datas de plantio, avaliação e colheita de plantas de soja no ano de 2016. 122
- Figura 2.** Temperaturas máxima e mínima, precipitação e datas de plantio, avaliação e colheita de plantas de soja no ano de 2017. 122
- Figura 3.** Volume acumulado de irrigação aplicado na cultura da soja durante a estação seca em 2016 (y1) $R^2 = 0,9862$ e 2017 (y2) $R^2 = 0,9719$ 123
- Figura 4.** Fotossíntese (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Condutância Estomática (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e Transpiração (E) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) em três cultivares de soja submetidas a quatro regimes de água (RH) para três cultivares (BRS 5980IPRO, NA 5909RG e BRS 7280RR) em soja com e sem suprimento de polímeros (RH 167 mm, RH 237 mm, RH 341 mm, RH 534 mm). Letras maiúsculas indicam diferenças entre o RH para controle e letras minúsculas indicam diferenças entre o RH para polímero e "*" indica diferenças significativas entre os tratamentos com e sem suprimento de polímero pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). 124
- Figura 5.** Produtividade (Kg ha^{-1}) em três cultivares de soja submetidas a quatro regimes de água RH). Controle (triângulos) e polímero tratado (círculos) para os anos de 2016 e 2017. "*" indica diferenças significativas entre as plantas tratadas com controle e polímero pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). (RH1 - 167 mm, RH2 - 237 mm, RH3 - 341 mm, RH4 - 534 mm). 125
- Figura 6.** Fotossíntese (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Condutância Estomática (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e Transpiração (E) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) em três cultivares de soja submetidas a quatro regimes hídricos (RH) em três estágios fenológicos do desenvolvimento da soja com

e sem suprimento de polímeros (RH1 - 167 mm, RH2 - 237 mm, RH3 - 341 mm, RH4 - 534 mm). Letras minúsculas indicam diferenças entre a RH para cada genótipo e * indica diferenças significativas entre as fases fenológicas dentro de cada RH pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)..... 126

Figura 7a. Fotossíntese (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Condutância Estomática (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e Transpiração (E) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) sob quatro regimes hídricos (RH) em três estágios fenológicos da soja com e sem suprimento de polímeros (RH1 - 167 mm, RH2 - 237 mm, RH3 - 341 mm, RH4 - 534 mm) para a cultivar BRS 5980IPRO. “*” indica diferenças significativas entre os tratamentos controle e polímero dentro de cada RH e fase fenológica pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)..... 127

Figura 7b. Fotossíntese (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Condutância Estomática (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e Transpiração (E) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) sob quatro regimes hídricos (HR) em três estágios fenológicos da soja com e sem suprimento de polímeros (RH1 - 167 mm, RH2 - 237 mm, RH3 - 341 mm, RH4 - 534 mm) para a cultivar NA 5909RG. “*” indica diferenças significativas entre os tratamentos controle e polímero dentro de cada WR e fase fenológica pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)..... 128

Figura 7c. Fotossíntese (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Condutância Estomática (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e Transpiração (E) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) sob quatro regimes hídricos (RH) em três estágios fenológicos da soja com e sem suprimento de polímeros (RH1 - 167 mm, RH2 - 237 mm, RH3 - 341 mm, RH4 - 534 mm) para a cultivar BRS 7280RR. “*” indica diferenças significativas entre os tratamentos controle e polímero dentro de cada RH e fase fenológica pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)..... 129

CAPÍTULO III

Figura 1. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Rendimento Quântico Operacional do Fotossistema II (F_q'/F_m') e Índice Fotoquímico de Reflectância (PRI)

para os tratamentos de fertilização FMX, NPK e Controle, avaliados durante 10 dias de privação de água no inverno de 2018 e regimes hídricos RH1, RH2, RH3 e RH4..... 151

Figura 2. Teor de Proteína (%) e Óleo nos grãos de soja, para os tratamentos de fertilização FMX, NPK e Controle, avaliados durante 10 dias de privação de água no inverno de 2018 e regimes hídricos RH1, RH2, RH3 e RH4. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente das demais pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. 151

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1. A CULTURA DA SOJA.....	2
2.1.1. Origem, histórico e importância	2
2.1.2. Fenologia e fotoperiodismo	5
2.2. TROCAS GASOSAS FOLIARES	7
2.2.1. Luz: qualidade e uso	7
2.2.2. Resistências a difusão do CO ₂	10
2.2.3. Os cloroplastos, pigmentos, proteínas e instrumental	13
2.2.4. Fluorescência da clorofila a.....	18
2.2.5. Índices Fisiológicos de Vegetação	23
2.2.6. Fluorescência transiente induzida a luz (Light Induced Fluorescence Transient - LIFT).....	26
2.2.7. Relações hídricas e comportamento isoídrico e anisoídrico	28
2.3. SUBSTÂNCIAS SUPERABSORVENTES E CONDICIONANTES DE SOLO (SSA)31	
2.4. REMINERALIZADORES DE SOLO.....	32
2.5. REFERÊNCIAS	35
CAPÍTULO 1. VALIDAÇÃO EM CONDIÇÕES CAMPO DE SENSORES ESPECTRAIS E FLUORESCÊNCIA ATIVA PARA FENOTIPAGEM DE CULTIVARES DE SOJA SOB REGIMES HÍDRICOS VARIÁVEIS NO CERRADO	57
RESUMO	58
ABSTRACT.....	60
1.1. INTRODUÇÃO.....	62
1.2. MATERIAL E MÉTODOS	64
1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	68
1.4. CONCLUSÕES	77
1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
CAPÍTULO 2. IMPACTO DO SUPRIMENTO DE POLÍMERO NA FOTOSSÍNTESE E PRODUTIVIDADE DE SOJA SOB DIFERENTES REGIMES HÍDRICOS	94
RESUMO	95
ABSTRACT.....	96
2.1. INTRODUÇÃO.....	97
2.2. MATERIAL E METODOS	98
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	101
2.4. CONCLUSÕES	112
2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

CAPÍTULO 3. ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS DE SOJA CULTIVADA COM REMINERALIZADOR DO SOLO NO CERRADO SOB REGIMES VARIÁVEIS DE ÁGUA.....	130
RESUMO.....	131
ABSTRACT.....	132
3.1. INTRODUÇÃO	133
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	134
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	138
3.4. CONCLUSÕES	142
3.5. REFERÊNCIAS	143
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	152

1. INTRODUÇÃO GERAL

A cultura da soja é responsável por movimentar bilhões de reais ao longo de sua cadeia produtiva, com produção estimada de 120 milhões de toneladas para a cultura na safra 2019/2020 (CONAB, 2020). No entanto, constantes flutuações ambientais como inundações, seca, elevadas temperaturas ou ainda, elevadas irradiâncias, além da combinação desses fatores têm comprometido o crescimento e a produtividade desta cultura no Brasil (OYA et al., 2004; MINUZZI et al., 2017; COUTINHO et al., 2018). Estes estresses ambientais comprometem a produtividade das lavouras, a estabilidade do fornecimento de alimentos e com isso, a segurança alimentar em nível local e mundial (SAMARAH et al., 2006). As variações climáticas correspondem a 60% da flutuação no rendimento das culturas de interesse agrônomico, tais como soja, milho, trigo e arroz (RAY, 2015). Cerca de 80% das variações na produtividade podem ser explicadas pelas variáveis climáticas no Japão, 47% na Coreia do Sul, 25-38% Índia, China, Indonésia, Tailândia, Brasil, Camboja, Peru e Espanha (RAY et al., 2015; ZHAO et al., 2017). Desta forma, a agricultura é classificada como um empreendimento de alto risco, sujeito a flutuações que podem proporcionar efeitos benéficos ou submeter as culturas a situações desafiadoras (MATIU et al., 2017).

Em se tratando da cultura da soja, uma vez que três países, Brasil, Estados Unidos e Argentina, detêm 87,54% da produção mundial (CONAB, 2019), quaisquer flutuações ambientais nestes países podem representar grandes perdas na produção e produtividade a nível mundial. No entanto, as maiores variações na produtividade em relação aos efeitos climáticos são atribuídas à Argentina (~47%) e as menores variações no rendimento desta cultura são atribuídos ao Brasil (26-34%) (RAY et al., 2015). Dentre os principais efeitos climáticos destaca-se o déficit hídrico, uma vez que este fator limitante pode comprometer a produtividade da cultura da soja em até 80%, afetando seu crescimento, desenvolvimento e com isso sua produtividade (ENGELS et al., 2017).

O uso de novas tecnologias que permitam a redução dos efeitos da seca, deve ser discutido, testado e se possível, incluído na seleção de plantas superiores e mais produtivas frente ao déficit hídrico. Dentre essas, destaca-se o uso de equipamentos para a avaliação da performance fotossintética (LONG et al., 1996; KOLBER, 2005) que permite a seleção e uma rápida sistematização do comportamento vegetal, em que características como a eficiência na incorporação do CO₂ e no uso da luz podem ser rapidamente avaliadas.

Existem ainda, substâncias superabsorventes, tais como polímeros ou hidrogéis (MIKKELSEN, 1994; YU et al., 2017) e ainda, a possibilidade de que o suprimento de pó de rocha possa contribuir como condicionante do solo, aumentando a capacidade de retenção de água devido à grande quantidade de argilominerais em sua constituição (SOUZA, 2017). Estes têm como pressuposto, a capacidade de tais polímeros e pó de rochas reterem água em condições de seca, para que seus efeitos nocivos possam ser mitigados (LONG et al., 1996; YU et al., 2017).

Diante do exposto, os objetivos deste trabalho foram validar, em condições de campo, sensores espectrais e de fluorescência ativa que utilizam a metodologia LIFT para fenotipagem de cultivares de soja submetidas a diferentes regimes hídricos; avaliar a influência da incorporação de um polímero superabsorvente de água aplicado no solo nas trocas gasosas, parâmetros de fluorescência da clorofila *a* e produtividade de cultivares de soja submetidas a quatro regimes hídricos em uma única fase fenológica (R5.5) em 2016 e em três fases fenológicas (R3, R5.1 e R5.5) em 2017 e avaliar a influência do remineralizador do solo (FMX) na fisiologia e produtividade da soja sob regimes hídricos (RH) variáveis.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A CULTURA DA SOJA

2.1.1. Origem, histórico e importância

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill], cultura largamente cultivada no Brasil, é uma planta de porte herbáceo pertencente à classe Magnoliopsida (Dicotiledônea), ordem Fabales, família Fabaceae, subfamília Faboideae, gênero *Glycine* L. (SEDIYAMA, 2009). Tem seu centro de origem e domesticação na Ásia, especificamente na China na região da Manchúria, no entanto, não há um consenso e exatidão sobre um ponto de origem fixo. Presume-se que tal cultura tenha vários sítios de domesticação e que esta ocorreu simultaneamente em diversos locais da China antiga. Seu cultivo já era realizado na China durante o período da Dinastia Shang (1700-1100 a.C.) (PAGANO; MIRANSARI, 2016). No continente americano, local onde hoje são relatadas as maiores produtividades, a soja começou a ser cultivada em 1765 d.C. trazida por Normam Bowen (PAGANO; MIRANSARI, 2016).

Seu cultivo como cultura agrônômica somente foi estabelecido em 1898 pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), e a partir deste momento, vários acessos foram trazidos para a América do Norte por William J. Morse e P.H. Dorsett, número que somam de 5000 a mais de 8000 acessos documentados no período de 1898 a 1949 (PAGANO; MIRANSARI, 2016). Assim, o cultivo desta cultura foi se expandindo, uma vez que seu uso era múltiplo e seu porte facilitava a colheita mecanizada (GUSSO et al., 2017). A soja espalhou-se por toda a América do Norte, alcançando ainda diversos países da América do Sul, tais como Brasil e Argentina, que hoje estão entre os grandes produtores em nível mundial (BLACK, 2000; PAGANO; MIRANSARI, 2016).

No Brasil, existem relatos de pesquisas iniciais com a soja em 1882, no entanto, somente em 1908, quando foram trazidas cultivares americanas para o Brasil, foram registrados alguns usos na alimentação humana. Em 1914, teve seu cultivo e estudo iniciado no Rio Grande do Sul, onde se difundiu para os demais estados sulistas, pelas condições edafoclimáticas e fisiológicas favoráveis ao seu cultivo. Em 1949, a cultura foi exportada pela primeira vez e

substituiu os grandes cafezais que sofriam pelas fortes geadas e condições climáticas desfavoráveis à sua exploração (MIYASAKA; MEDINA, 1977).

Até 1960, o cultivo da soja restringia-se ao sul do país, em estados como Rio Grande do Sul, Paraná e Santa Catarina, devido a restrições fisiológicas impostas pelo fotoperiodismo, pois, a cultura era adaptada a condições de latitude de aproximadamente 30°, e em latitudes menores o florescimento era antecipado, diminuindo sua produtividade (CATTELAN; DALL'AGNOL, 2018). Segundo esses autores, fatores como políticas governamentais de estímulo à produção de trigo no Sul em que a soja participava como cultura de sucessão e ainda, os ótimos preços praticados pelo mercado internacional na época, tornaram a cultura extremamente atrativa, para os agricultores.

No entanto, foi na década de 80 que houve uma expansão mais significativa da cultura, com sua introdução no Centro-Oeste do país, nos estados de Mato Grosso, Goiás, Mato Grosso do Sul e para a região Norte do país. Essa expansão foi devido ao melhoramento genético da cultura que consistia na seleção de materiais que eram menos sensíveis ao fotoperíodo, com o período juvenil longo, promovendo um desenvolvimento satisfatório em latitudes de 10°S a 12°S, permitindo a expansão da cultura para os demais estados da federação. Além disso, em 2000, os efeitos da latitude foram completamente dominados, com a seleção de materiais que se desenvolviam em condições de fotoperíodo de 0° a 5°S ou 5°N, tornando a soja uma cultura extensamente cultivada em nível nacional (CATTELAN; DALL'AGNOL, 2018). Além disso, a extensa área propensa à mecanização tornou-se atrativa, permitindo o monocultivo em larga escala desta cultura (RITCHEY et al., 1980). Desta forma, neutralizando-se problemas inerentes à acidez e à baixa fertilidade natural dos solos do Cerrado brasileiro, seu plantio tornou-se um imenso sucesso, tornando o Brasil um dos três maiores produtores mundiais, juntamente com EUA e Argentina (MARCANO-MARTINEZ et al., 1989; CAIRES et al., 1998; CATTELAN; DALL'AGNOL, 2018).

Atualmente, após o cultivo da soja ter se disseminado em áreas agricultáveis de todo o país, restaram poucas fronteiras agrícolas, e uma delas é a região definida pela junção de quatro estados a saber, Maranhão, Tocantins, Piauí, Bahia e recentemente, Pará (MATOPIBAPA). Tal região tem sido considerada uma das últimas fronteiras agrícolas, por possuir terras passíveis de mecanização e condições edafoclimáticas favoráveis à implementação da agricultura (CARDOSO et al., 2018). A área plantada e a produtividade por área em tal região têm aumentado a cada ano, e na safra 2019/2020, registrou-se produção de 16 milhões de toneladas, o que correspondeu a aproximadamente 13,7% da produção nacional (CONAB, 2020). Desta forma, o cenário do agronegócio da soja evoluiu e vem evoluindo a cada ano pela incorporação de novas tecnologias, maiores investimentos e pela agregação de novas áreas ao seu cultivo, tornando tal cultura cada vez mais atrativa.

2.1.2. Fenologia e fotoperiodismo

Ao longo de seu desenvolvimento, a cultura da soja possui várias fases que caracterizam morfofisiologicamente seu ciclo fenológico. A emergência da soja pode variar de acordo com a percentagem de germinação e com o vigor do lote de sementes utilizado, mas normalmente, ocorre por volta de 7 dias após plantio. Logo após sua emergência, a plântula recém-formada possui os cotilédones ainda fechados e esta fase é denominada VE. Após a fase VE, já com os cotilédones abertos e completamente desenvolvidos, a plântula iniciará a formação de um par de folhas com somente uma folha cada, desta forma, o exato momento em que este par de folhas ainda não maduras fisiologicamente deixa de se tocar indica o início da fase VC (FEHR et al., 1971).

A partir do término da fase VC, todos os eventos que ocorrem, tais como lançamentos de novos trifólios, crescimento em altura, formação e alongamento dos entre nós, ou seja, todos os eventos de crescimento vegetativo são representados pela letra V e eventos reprodutivos

relacionados a aparecimento de órgãos reprodutivos, aparecimento de vagens e aumento destas ao longo do tempo são representados pela letra R, referente ao período reprodutivo (FARIAS et al., 2007). Cada período, vegetativo ou reprodutivo, em que a planta se encontrar é numerado com algarismos alfa numéricos, indicando assim, a presença de um evento fenológico marcante (FARIAS et al., 2007; BOARD; KAHLON, 2011).

Na primeira etapa da fase vegetativa denominada V1, o primeiro evento observado é o amadurecimento do par de folhas individuais que surgiram, a partir deste momento, todas as demais folhas que surgirem serão trifolioladas. A segunda etapa, V2, é caracterizada pelo surgimento do primeiro trifólio, seu fim se dá quando o segundo trifólio é emitido, iniciando a fase V3, assim, o número de trifólios poderá indicar em qual fase vegetativa a cultura se encontra. Desta forma, a depender do hábito de crescimento da cultura, indeterminado ou determinado, a planta poderá lançar trifólios indefinidamente, ou ainda, ter um número de trifólios definido por características inerentes ao genótipo (FARIAS et al., 2007; BOARD; KAHLON, 2011). De acordo com autores como Fehr et al. (1971) e Farias et al. (2007), a fase reprodutiva pode ser classificada como: florescimento (R1 e R2), desenvolvimento da vagem (R3 e R4), desenvolvimento do grão (R5 e R6) e amadurecimento da planta de forma geral (R7 e R8). O desenvolvimento dos grãos é dividido ainda, segundo Ritchie et al. (1977), em outras 5 fases, numeradas de R5.1 a R5.5, que levam em consideração a percentagem de grãos granados, de 10%, 11 a 25%, 26 a 50%, 51 a 75% e 76 a 100% para as fases R5.1, R5.2, R5.3, R5.4 e R5.5, respectivamente.

O fotoperíodo é umas das respostas sazonais mais importantes em relação ao florescimento e evocação floral (HA et al., 2015; ZHU et al., 2015). Desta forma, a soja utilizada nos EUA, adaptada a regiões com latitudes elevadas ($>30^\circ$), era cultivada em locais com um período de luz maior que doze horas, e assim, seus fotorreceptores indicavam a permanência da cultura em seu estágio vegetativo, tornando esta fase um pouco mais extensa

(NEUHAUS, 1993; ELLIOTT et al., 2004). Isto proporcionava um maior tempo para formação de folhas fisiologicamente maduras, que servem como fonte de carboidratos e aminoácidos durante a formação da vagem e enchimento de grãos, tornando assim esses materiais mais produtivos (HAN et al., 2006; NICO et al., 2015).

Tais materiais, ao serem trazidos para o Brasil, sem nenhum processo de melhoramento para regiões de baixa latitude, como a grande maioria das áreas produtoras em 1898, como a Bahia, não obtiveram sucesso, uma vez que tais fotoreceptores percebiam então o menor comprimento do dia e em virtude das menores latitudes encontradas, o ciclo desta cultura se tornava precoce (LI et al., 2018). Desta forma, a fase reprodutiva demasiadamente adiantada e o período juvenil, isto é, o tempo para a produção de folhas e órgãos vegetativos, curto, resultava em produtividades extremamente baixas (HAN et al., 2006; AHSAN et al., 2019). Assim, com condições climáticas semelhantes as encontradas nos EUA, a soja ao ser cultivada no sul do país apresentou grandes respostas em produtividade, tornando-se uma cultura de grande importância nacional (BOARD AND KAHLON, 2011).

2.2. TROCAS GASOSAS FOLIARES

2.2.1. Luz: qualidade e uso

Todos os processos inerentes ao metabolismo do carbono dependem da luz direta ou indiretamente (ROBBINS; PHARR, 1987). Existe uma dualidade comportamental para a luz, pois esta comporta-se como onda e partícula (KEREN; PALTIEL, 2018). Assim, a luz possui comprimento de onda, que é a distância de duas cristas sucessivas (LAHIRI, 2011), e ainda frequência, que representa o número de ondas que passam por determinado observador em um certo intervalo de tempo, se comportando assim como onda (OUZOUNIS et al., 2015). E ainda, possui característica de partícula, e cada partícula recebe o nome de Fóton, sendo que cada Fóton é carregado internamente por uma energia denominada *Quantum*, no plural, *Quanta*

(KEREN; PALTIEL, 2018). Esta energia associada ao *Quanta* está diretamente ligada ao comprimento de onda uma dada onda, assim, quanto menor o comprimento de onda, maior a energia associada aos pacotes energéticos, os *Quanta* e do contrário, quanto maior o comprimento de onda, menor a energia associada aos *Quanta* (EMERSON; RABINOWITCH, 1960).

A luz absorvida e passível de ser utilizada nos processos fotossintéticos está compreendida no comprimento de onda de 400 a 700 nm, e desta forma, o primeiro comprimento de onda compreende uma faixa mais energética e o segundo, uma menos energética (OUZOUNIS et al., 2015). Dentro desta faixa, existe uma porção que não é absorvida pelas plantas, sendo refletida e percebida por nossos olhos que pertence a faixa de aproximadamente 550 nm, dando assim a coloração verde as plantas (McCREE, 1972; LICHTENTHALER, 2007; KUME et al., 2017).

A energia lumínica absorvida pelos complexos antena pode ser direcionada para os centros de reação por transmissão via ressonância, dissipada por meio através de calor ou ainda, a re-emitida através de um fóton (REITER et al., 2020). As moléculas de clorofila após absorverem os *quanta*, tornam-se eletronicamente excitadas, e esta energia de excitação confere um maior potencial de oxirredução as mesmas (GARCIA-MOLINA; LEISTER, 2020). Assim, ou esta energia é passada para uma outra molécula oxidada, reduzindo-a, ou a molécula eletronicamente excitada retorna ao seu estado inicial, liberando sua energia re-emitindo um fóton (RÜHLE et al., 2018), o que pode ser observado quando um *pool* de plastoquinonas volta ao seu estado basal.

Após serem absorvidos pelos complexos coletores de luz, os *quanta* tornam os elétrons de um resíduo de tirosina excitados, e com o potencial de reduzir outra molécula (KELLER et al., 2018). Ao perder um elétron, este resíduo de tirosina torna-se oxidado e com a capacidade de retirar elétrons de um complexo de manganês (MIAO et al., 2017), até que este adquira

potencial de oxirredução para retirar elétrons da água. Desta forma, os elétrons são retirados da água e passados de molécula a molécula de acordo com seu potencial de oxirredução (NAJAFPOUR et al., 2014).

Os elétrons são então, passados por carreadores de elétrons tais como feotitina, plastoquinonas e plastocianinas para grandes complexos proteicos como complexo citocromo b6/f e o próprio fotossistema dois (FSII) (WEIGEL et al., 2003; PRIBIL et al., 2014). Enquanto existe o fluxo de elétrons nas proteínas nas membranas dos tilacóides, H⁺ é bombeado para o lumen do tilacóides, e então, é formado um gradiente de H⁺, capaz de ser utilizado por uma ATP sintase, culminando na produção do Trifosfato de Adenosina (ATP) (ARAÚJO et al., 2010; SCHERTL; BRAUN, 2014). A transferência de elétrons na cadeia de transporte de elétrons culmina na redução de uma de Fosfato de Dinucleotídeo de Nicotinamida e Adenina (NADP⁺) em NADPH e logo após, ambos (ATP e NADPH) são utilizados como poder redutor no estroma do cloroplasto para a incorporação do CO₂ no Ciclo de Calvin-Benson (BAKER et al., 2008; ROCHAIX et al., 2011).

Ainda, tal energia de excitação capturada pode ser dissipada através da fluorescência e os elétrons contidos nas moléculas de clorofila, quando excitados, podem retornar ao seu estado inicial, dissipando sua energia na forma de fluorescência, que consiste de uma onda eletromagnética de maior comprimento de onda e com isso, menos energia (MAXWELL; JOHNSON, 2000). A energia pode dissipar-se ainda na forma de calor, assim, comprimentos de onda altamente energéticos, para serem passíveis de absorção, tem de ter seu excedente eliminado na forma de calor, também, todo excedente energético não utilizado pode ser dissipado na forma de calor (KOLBER et al., 1998; MAXWELL; JOHNSON, 2000; KOLBER et al., 2005; BAKER et al., 2008).

Cada cultura é capaz de usar uma determinada quantidade da luz que sobre ela incide ao longo do dia e o uso de energia lumínica é dependente da capacidade metabólica dos vegetais

em não somente receber, mas processá-la (BAKER, 2008). Desta forma, a quantidade de moléculas de clorofilas e seus centros de reação disponíveis, aceptores de elétrons e sua taxa de regeneração são de fundamental importância para determinar o ponto de saturação pela luz (MAXWELL; JOHNSON, 2000). De forma simplificada, através de curvas de luz, em que se mede a assimilação líquida de CO₂ em função da irradiância, é possível obter importantes informações a respeito de quaisquer organismos fotossintetizantes (EVANS; POORTER, 2001).

Quando não existe nenhuma fonte de luz disponível e a quantidade de luz fornecida se aproxima de 0 μmol de irradiância, predominam eventos respiratórios, ou seja, liberação de CO₂ (YAO et al., 2017). No entanto, aumentando-se a quantidade de luz fornecida à cultura, haverá um momento em que a liberação e consumo de CO₂ serão iguais, este ponto é caracterizado como ponto de compensação lumínico (OGREN; EVANS, 1993). Após esta fase, aumentando-se a irradiância as taxas fotossintéticas aumentam de forma linear, até alcançar um ponto em que tais aumentos não são mais observados, a este ponto dá-se o nome de ponto de saturação lumínica, em que aumentos na irradiância não resultam em aumentos nas taxas fotossintéticas (EVANS; POORTER, 2001; HABERMANN et al., 2003; PERI et al., 2004).

2.2.2. Resistências a difusão do CO₂

Atualmente, a concentração de CO₂ ambiente é de aproximadamente 400 ppm (STERK et al., 2016), e esta tem aumentado a cada ano, fruto da influência antropogênica no planeta. Tal aumento, tem influenciado a vida em diversas de suas instâncias, aumentando a temperatura dos mares, proporcionando derretimento de geleiras e ainda, influenciando no metabolismo vegetal, uma vez que o CO₂ é um componente chave na produção de biomassa por parte dos organismos fotossintetizantes (ZOUNDI, 2016).

O CO₂ ambiente para ser incorporado a moléculas de açúcares devem movimentar-se até o seu sítio de carboxilação localizado nos cloroplastos. Este movimento acontece por difusão, mas algumas barreiras devem ser vencidas para que este chegue ao seu destino (EVANS et al., 2009). Uma das primeiras barreiras à entrada do CO₂ é justamente a cutícula, camada cerosa que recobre a folha e oferece uma grande resistência à entrada de CO₂. Sobre ela, existe ainda uma camada de vapor de água formado através da transpiração, denominada camada limítrofe (APHALO; JARVIS, 1993). Esta camada, varia com a espessura do limbo foliar de modo que quanto maior o limbo foliar, maior será sua espessura (APHALO; JARVIS, 1993). Ainda, a espessura da camada limítrofe pode conduzir a um menor ou maior deficit de pressão de vapor, que pode contribuir sobremaneira para o fechamento estomático (KERSTIENS, 1998; BUNCE, 2006).

A espessura de tal camada é proporcional à largura da folha, e desta forma, quanto maior a largura foliar, maior será sua espessura (BAKER; MYHRE, 1969). Esta camada está sujeita aos efeitos de ventos incidentes no limbo foliar, que agem retirando essa camada de vapor de água formada pelos processos transpiratórios. A importância desta camada limítrofe está fundamentada no fato de que o gradiente de pressão de vapor de água entre folha e atmosfera é sobremaneira maior que o gradiente de CO₂ entre a folha e a atmosfera, assim, como a difusão é dependente deste gradiente, as perdas de água pelas plantas acontecerão de forma mais rápida e com um volume maior, se comparada à entrada de CO₂. Desta forma, a existência de uma camada úmida na superfície foliar reduz este gradiente de pressão de vapor, reduzindo assim as perdas de água para a atmosfera, e desta forma, a resistência que a camada limítrofe impõe a entrada de CO₂ é reduzida, pois esta camada de umidade influencia positivamente na abertura estomática (APHALO; JARVIS, 1993; KRAMER; BOYER, 1995).

Os estômatos são órgãos vegetais responsáveis pelas trocas gasosas foliares, isto é, entrada e saída de água e CO₂ (JAMES E.; PALLAS, Jr, 1966). Estes oferecem grande

resistência à difusão do CO₂, sendo extremamente sensíveis a mudanças no potencial hídrico foliar de modo que, detectando-se situações de déficit hídrico, variações nas concentrações de CO₂ e ainda, a presença de hormônios, tais como o ácido abscísico (ABA), o comportamento dos estômatos pode ser modificado (PERKS et al., 2002; ENGINEER et al., 2016; SARADADEVI et al., 2017). Morr (1988), demonstrou as interações entre o CO₂ e os estômatos, e ainda, as respostas relacionadas a este, esclarecendo que os estômatos são sensíveis às concentrações internas de CO₂ (C_i), e desta forma, este funciona como um sensor intracelular informando às células guarda dos estômatos quando devem fechar ou abrir.

Assim, como a concentração ambiente de CO₂ (C_a) normalmente mantém-se constante ao longo do dia, o consumo do CO₂ conduz a sua depleção, e com isto, redução em C_i, isto leva à abertura do poro estomático, indicando que os processos fotossintéticos demandam CO₂ (FONTE). O contrário, caso a maquinaria fotossintética esteja danificada, ou caso não exista iluminação suficiente para os eventos fotossintéticos, como nos casos de folhas adaptadas ao escuro, ou que sofrem autosombreamento, a C_i aumenta, levando ao fechamento estomático (MORR et al., 1988; ENGINEER et al., 2016).

Estudos relatam que a regulação do fechamento do poro estomático pode ocorrer através da sinalização por meio do ânion Carbonato (HCO₃⁻), CO₂ e ainda, do íon Ca²⁺. Tal regulação acontece através de canais que convergem duas vias metabólicas de sinalização, desta forma a presença de HCO₃⁻ e CO₂ ativam canais de ânions Tipo-S e Tipo-R, responsáveis pelo transporte de K⁺ e Cl⁻ para dentro ou para fora das células guarda dos estômatos, regulando assim, sua abertura e fechamento (MORR, 1988; VAHISALU et al., 2008; HU et al., 2010; XUE et al., 2011). Estudos com mutantes na codificação de genes que tornam a planta insensíveis ao HCO₃⁻ e CO₂, corroboram ainda uma outra importante via de regulação da abertura estomática, o ABA. Segundo Xue (2011) tais mutações afetaram drasticamente a capacidade e a sensibilidade das plantas responderem ao HCO₃⁻ e CO₂, de forma que nenhuma

resposta de fechamento estomático foi observada se comparada ao tipo selvagem, enquanto isso, tais estômatos destes mutantes permaneceram respondentes ao ABA, e o fechamento estomático foi observado.

Após adentrar a célula e vencer as dificuldades impostas pelos estômatos, o CO_2 deve dirigir-se para os sítios de carboxilação da Rubisco, e para isto deve percorrer o mesófilo foliar, e desta forma, enfrentar a resistência imposta por este a sua difusão (PEREIRA et al., 2020). Sua importância, de acordo com Warren (2006), era ignorada uma vez que se assumia que a concentração de CO_2 na cavidade subestomática e dentro dos cloroplastos era praticamente a mesma. No entanto, sabe-se que a condutância mesofílica (g_m) isto é, a facilidade com que o mesófilo é transpassado, pode ser muito menor do que se imaginava, limitando inclusive os processos fotossintéticos, dado que as concentrações cloroplastídicas de CO_2 (C_c) dependem da g_m (FLEXAS, 2007).

Desta forma, inúmeros fatores de estresse ambiental podem influenciar a g_m , tais como nutrição mineral, fatores abióticos como seca, temperatura e salinidade e ataque de patógenos (FLEXAS et al., 2002; CENTRITTO; CHARTZOULAKIS, 2003; SAMPOL et al., 2003; WARREN; DREYER, 2006; DETMANN et al., 2014). Assim, quaisquer influências na g_m , poderão comprometer os processos fotossintéticos, uma vez que estes dependem do CO_2 , e com isso, variáveis como o crescimento da cultura, formação e enchimento de grãos, diminuindo a produtividade da cultura (WARREN; DREYER, 2006; DETMANN et al., 2014).

2.2.3. Os cloroplastos, pigmentos, proteínas e instrumental

Ao passar por todas as resistências à sua difusão, o CO_2 se move para dentro das células através de uma enzima, a anidrase carbônica, que converte o CO_2 em HCO_3^- (as membranas celulares são impermeáveis ao CO_2), que se move para o sítio de carboxilação da Rubisco, localizada em organelas altamente especializadas, os cloroplastos (MORR, 1988; VAHISALU

et al., 2008; HU et al., 2010; XUE et al., 2011). Tais organelas são responsáveis pela grande maioria dos eventos fotossintéticos, que vão desde a captura da energia lumínica à incorporação do CO₂ pela Rubisco (BAKER et al., 2008). Os cloroplastos são organelas que possuem origem através da teoria endossimbionte, uma vez que várias características desta organela como dupla membrana, sendo a membrana interna aquela que possui permeabilidade seletiva, parte de seu material genético é próprio e possui comportamento autônomo em relação a estímulo externos (MORIYAMA; SATO, 2014; ARCHIBALD, 2015; SATO et al., 2020). Tais características fazem desta organela uma peça de fundamental importância para o reino vegetal. Além das duas membranas supracitadas, estas organelas possuem uma estrutura interna peculiar, e a unidade básica de sua organização é o tilacóide (SEMENOVA et al., 2002). Sua forma é elíptica achatada e eles se agrupam para formar os grânulos, que são constituídos de vários tilacóides empilhados (DEKKERA; BOEKEMA, 2005). Os grânulos encontram-se embebidos numa matriz aquosa, o estroma, local onde ocorre a incorporação do CO₂ pela Rubisco através do ciclo de Calvin-Benson (BAKER, 2008; SABATER, 2018; PEREIRA et al., 2020).

Nas membranas dos tilacóides estão localizados os componentes proteicos relacionados a fase fotoquímicas da fotossíntese, e nestas membranas ocorrem a captura da energia lumínica e tal energia é utilizada para a produção de poder redutor na forma de NADPH e enquanto os elétrons são transportados através da cadeia de transporte de elétrons, é formada uma força próton motora que através de uma ATP sintase governa a produção de ATP (DEKKERA; BOEKEMA, 2005). A luz é capturada por complexos coletores de luz (CCL), que são formados por carotenóides, clorofilas a e b, após sua captura, a energia lumínica é direcionada aos centros de reação dos fotossistemas (BLANKENSHIP; CHEN, 2017; KELLER et al., 2018).

Os carotenóides são moléculas lineares que possuem múltiplas duplas ligações conjugadas ao longo de sua estrutura, e absorvem a luz em comprimentos de onda altamente energéticos, na faixa de 400 a 500 nm. As clorofilas, são pigmentos responsáveis por absorver

a luz nos comprimentos de onda na faixa do azul (430 nm) e vermelho (660 nm), são formados por um anel tetrapirrólico, que é responsável pela coloração verde a qual nossos olhos percebem e ainda, uma cauda fitol (BATRA et al., 2014; THRANE et al., 2015).

A energia lumínica é então direcionada aos centros de reação do Fotossistema II (FSII), que absorverá a luz no comprimento de onda de 680 nm. O FSII é um complexo proteico, formado por duas subunidades denominadas D1 e D2, e ligado a ele estão aceptores de elétrons tais como clorofilas, feofitinas e plastoquinonas, que recebem e transportam os elétrons excitados ao longo da cadeia de transporte de elétrons (VINYARD et al., 2013; McFARLAN et al., 2019). A proteína D1, no entanto, é de fundamental importância, e sem ela o transporte de elétrons na cadeia de transporte de elétrons pode ser interrompido em um fenômeno denominado fotoinibição. A fotoinibição acontece quando tal proteína é danificada, e assim sendo, pode ser reparada, ou então, necessita ser removida das membranas dos tilacóides para que uma nova proteína seja inserida em seu lugar, através da síntese “de novo” (ASSADA, 1999; HATURVEDI; HYAM, 2000). Os elétrons transportados na cadeia de transporte de elétrons são direcionados a outros complexos proteicos tais como: complexo citocromo b₆f, plastocianinas e assim, para o centro de reação do Fotossistema I (FSI), que capturam energia lumínica na faixa do 700 nm e possuem potencial de oxirredução negativo o suficiente para reduzir o NADPH. Este, também é um complexo proteico, e a energia recebida proporciona mudanças no estado de excitação energética de suas moléculas que culmina com a formação de poder redutor NADPH (VALLADARES et al., 2005; NIELSEN et al., 2013; JOHNSON et al., 2016).

Após sua formação na etapa fotoquímica, o ATP e NADPH é utilizado no estroma dos cloroplastos na fase bioquímica da fotossíntese. Esta etapa envolve, de uma forma geral, três processos a saber: carboxilação, redução e regeneração (STIRBET et al., 2019). A primeira etapa envolve a incorporação do CO₂ ao uma molécula de RuBP, através da enzima Rubisco,

formando assim duas moléculas de 3-fosfoglicerato (SEMER et al., 2018). A segunda etapa caracteriza-se pela redução das duas moléculas de 3-fosfoglicerato formadas na primeira etapa, em trioses fosfatadas, utilizando-se o poder redutor formado na etapa fotoquímica da fotossíntese. Por fim, na terceira ocorre a regeneração do açúcar utilizado como substrato para a incorporação do CO₂. De forma geral, estima-se que apenas a sexta parte das trioses fosfatadas é utilizada para a síntese de amido e sacarose, o restante é utilizado na regeneração do RuBP, de modo que não falte substrato para a incorporação do CO₂ (SAGE, 1990; SHIMIZU et al., 2015).

Desta forma, a taxa de consumo de CO₂, é uma excelente forma de se avaliar o comportamento do metabolismo primário frente a quaisquer flutuações ambientais (LONG et al., 1996). No entanto, como as concentrações de CO₂ atmosféricos são de aproximadamente 400 ppm ou 0,04% (v/v), considerado baixo em relação a outros gases como o O₂, 21000 ppm, ou 21% (v/v), os métodos para sua mensuração devem ser sensíveis o suficiente para detectar sutis mudanças nas concentrações deste gás (LONG et al., 1996).

Dada a importância dos processos que envolvem o uso do CO₂, diversos equipamentos para sua mensuração surgiram ao longo do tempo (LONG et al., 1996). Dentre os métodos existentes, aqueles que utilizam sistemas gasométricos de medição das “trocas gasosas através do infravermelho” (“Infra Red Gas Analyser” - IRGA) são os mais difundidos. A adoção do infravermelho (IV) para a mensuração das trocas gasosas deve-se ao fato de que moléculas heteroatômicas, tais como CO₂ e H₂O, possuem picos de absorção em faixas muito bem definidas do IV (LONG et al., 1996; BALDOCCHI, 1997; PESSARAKLI, 2005). Ademais, o CO₂ possui bandas de absorção de 4,25, 2,66, 2,77 e 14,99 μm, no entanto sua banda de absorção mais proeminente é de 4,25 μm. Por outro lado, o pico de absorção da H₂O é de 2,7 μm e sobrepõe-se com uma das bandas do CO₂, no entanto, não existe nenhuma influência

sobre sua mensuração, uma vez que é encontrada em quantidades muito mais elevadas que o CO₂ e o pico deste não é o de maior absorção nesse comprimento de onda.

O IRGA é composto de quatro partes básicas, a saber: uma fonte de banda larga na faixa do infravermelho, uma célula gasosa, um filtro óptico e um receptor (Long et al., 1996). Desta forma, o gás a ser amostrado entra por uma célula gasosa e poderá ser consumido pela folha, reduzindo sua quantidade absoluta, e mais energia irá alcançar o detector, com isso, a concentração de CO₂ poderá ser detectada e mensurada. A função do filtro é eliminar os demais comprimentos de onda que poderiam causar algum tipo de ruído na análise. É utilizada uma câmara de gás somente para a medição de uma referência obtida, por exemplo do ar atmosférico, e em outra câmara de gás o ar é direcionado para a câmara foliar, é então calculada a diferença entre a referência (ar atmosférico) e a câmara de assimilação (LONG et al., 1996).

Em um IRGA que opera com sistema aberto ou fechado, a base de mensuração acima não mudará, somente algumas características serão diferentes. Em sistemas fechados, o ar não é renovado, assim, o mesmo ar que é medido no IRGA, retorna para a câmara de assimilação e assim consecutivamente (LONG et al., 1996). Esta característica traz algumas desvantagens, tais como, condensação do vapor de água nos tubos devido ao acúmulo de vapor de água causado pela transpiração, o que pode interferir na umidade mensurada pelo IRGA (PESSARAKLI, 2005). Como o IRGA opera em local distante da câmara de assimilação, existe um atraso na mensuração da informação, uma vez que para o IRGA mensurar o quanto de CO₂ e H₂O foram consumidos e liberados respectivamente, os gases resultantes devem sair da câmara e cumprir toda a trajetória entre a câmara de assimilação e o IRGA (LONG et al., 1996). Existe ainda um sério problema de aclimatação das folhas ao novo ambiente, e este problema torna-se mais sério, em sistemas fechados, pois neste caso, se a cultura avaliada possui elevadas taxas fotossintéticas, ocorrerá rápida depleção do CO₂ no circuito, pois antes que ela se adapte ao ambiente, este gás terá sua concentração drasticamente alterada (LONG et al., 1996).

Em sistemas abertos, a grande diferença é que o ar passa somente uma única vez pela câmara de assimilação, e após isto, é eliminado. Nestes sistemas, a quantidade de ar atmosférico que é destinado à câmara de assimilação e para um IRGA de referência é a mesma, e ambos após passarão pelos seus respectivos IRGA's, isto é, existe um IRGA para a leitura do ar da amostra após este passar pela câmara de assimilação e outro para a referência. Outro benefício que transformou a análise das trocas gasosas é a instalação dos IRGAs juntamente com a câmara de assimilação, o que proporciona ganhos em tempo, acurácia e redução de erros inerentes ao caminho do CO₂ e H₂O da câmara de assimilação até o IRGA em sistemas fechados (LONG, 1996).

2.2.4. Fluorescência da clorofila *a*

A fluorescência da clorofila *a* é umas das técnicas de mensuração do potencial fotossintético mais poderosas, uma vez que determina o comportamento do metabolismo primário de forma não invasiva, não destrutiva e ainda, com altíssimo rendimento (KRAUSE; WEIS, 1991; CAEMMERER, 2000; GOTTARDINI et al. 2014). Com ela, o potencial fotossintético pode ser mensurado através da excitação de elétrons da cadeia de transporte de elétrons com elevada correlação com o potencial produtivo. Após a captura da energia de excitação pelos centros de reação dos fotossistemas, tal energia pode ser dissipada de três formas: assimilação do CO₂, calor e ainda, como fluorescência (MAXWELL; JOHNSON, 2000).

Em plantas sem nenhuma injúria e em condições ambientais normais, isto é, irradiância não superior a de saturação, temperatura ambiente e sem privação de água, cerca de 80% da luz absorvida é direcionada para os processos fotossintéticos, denominados processos Fotoquímicos, 3 a 5% usado como Fluorescência e o restante como Calor, ambos denominados processos não-fotoquímicos (MAXWELL; JOHNSON, 2000; ROHÁČEK et al., 2008). Assim,

existe uma relação antagônica entre estes, e desta forma, se os processos fotoquímicos, isto é, fotossintéticos, aumentam, necessariamente processos não fotoquímicos diminuem, e vice e versa (WEIZ; BERRY, 1987; GOVINDJEE, 2004; ROHÁČEK et al., 2008).

A separação de ambas as formas de dissipação foi registrada através do uso do DCMU, um inibidor metabólico que impede a transferência de elétrons da Quinona A (Q_A) para a Quinona B (Q_B), assim, ocorre uma intensa liberação de fluorescência, uma vez que todos os processos fotoquímicos são eliminados (MAXWELL; JOHNSON, 2000). No entanto, Baker (2008) relata que tal metodologia não é capaz de separar a proporção adequada de energia destinada aos processos fotoquímicos e não fotoquímicos. Assim, somente com a aplicação de pulsos de luz de saturação é possível formar um *pool* de Q_A reduzidas, permitindo a medição contínua da fluorescência emitida pelas folhas e desta forma a avaliação do potencial fotoquímico do FSII, que na ausência da fotorrespiração equivale ao rendimento quântico na assimilação do CO_2 (BRADBURY; BAKER, 1984).

Para garantir que todas as Q_A estejam completamente oxidadas, as folhas são adaptadas ao escuro, ou ainda, em condições de campo as medições podem ser tomadas na ante-manhã ou ainda, logo após o entardecer, para garantir tal estado de oxidação (BAKER, 2008). Após, um curto feixe de luz ($0,1 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) incide sobre a superfície a ser analisada, de forma a se obter a Fluorescência Basal (F_0), este processo acontece sem que as Q_A sejam reduzidas e ainda, de maneira que os Centros de Reação (CR) do FSII permaneçam “Abertos”. Assim, um curto pulso de luz actínica com menos de menos que 1s, com elevada Densidade de Fótons Fotossintéticos (DFP) acima de alguns milhares de $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, é disparado sobre a superfície foliar levando a completa saturação, em que as Q_A se encontrarão completamente reduzidas (MAXWELL; JOHNSON, 2000; BAKER, 2008). Este ponto define os CR como fechados, ou seja, é formado um “*pool*” de quinonas completamente reduzidas e a metodologia utilizada é a fluorescência de pulso modulado (GENTY et al., 1989).

Segundo Roháček (2008), a fluorescência é a reemissão de um fóton e assim, após a excitação das Q_A , estas após liberarem sua energia de excitação e voltarem ao seu estado inicial, ou seja, estado oxidado, emitem a energia absorvida através de fluorescência. Em relação à contribuição de cada FS, Baker (2008) relata que somente o CR do FSII é responsável por mais de 90% da emissão em fluorescência, uma vez que os elétrons excitados provêm do FSII, com a decaída energética neste FS os elétrons não são transferidos para o FSI, interrompendo assim o fluxo linear de elétrons. É possível assim, quantificar o rendimento quântico destinado a Fluorescência (Φ_F) através da razão entre o número de fótons emitidos pelo número de fótons absorvidos. Assim, n_F representa a constante relacionada a dissipação através da fluorescência e k_i , o somatório de todos os possíveis processos de dissipação a saber; k_F , k_D e k_P , fotossintético, através de calor e por fluorescência, respectivamente (ROHÁČEK et al., 2008; BAKER, 2008).

$$\Phi_F = \frac{n_F}{n_A} = \frac{k_F}{\sum k_i} \quad (1)$$

Considerando-se que a constante k_D assume todos os processos responsáveis pela liberação de calor, de forma geral, tem-se três constantes, k_F , k_D e k_P (ROHÁČEK, 2008; BAKER, 2008) e cada uma dessas constantes pode ser descrita segundo Baker (2008) e Roháček (2008) como:

$$\Phi_D = \frac{k_D}{k_D + k_F + k_P} \quad (2)$$

$$\Phi_{Fo} = \frac{k_F}{k_D + k_F + k_P} \quad (3)$$

$$\Phi_{Fm} = \frac{k_F}{k_D + k_F} \quad (4)$$

$$\Phi_P = \frac{k_P}{k_D + k_F + k_P} \quad (5)$$

A Φ_{Fm} não possui a constante fotossintética (k_p), isto se deve ao fato de que para a obtenção de tal parâmetro as Q_A estejam completamente oxidadas, e assim, não existe transporte de elétrons ao longo da cadeia de transporte de elétrons igualando tal processo a zero (GENTY, 1989; BAKER, 2008). Ainda, a Fluorescência Variável (F_v) pode ser obtida através da subtração de F_m e F_0 seja:

$$F_v = F_m - F_0 \quad (6)$$

Desta forma, o rendimento quântico máximo do FSII, ou seja, F_v/F_m , é dado por:

$$F_v/F_m = \frac{\Phi_{Fm} - \Phi_{F0}}{\Phi_{Fm}} \quad (7)$$

Aplicando-se (3) e (4) em (7), é possível encontrar (5), e determinar que o rendimento quântico máximo do FSII que é igual ao rendimento fotossintético, ou a eficiência fotossintética de quaisquer organismos fotossintetizantes. O F_v/F_m é obtido em condições em que o tecido vegetal está adaptado ao escuro, e reflete o potencial máximo da maquinaria fotossintética, no entanto, quando mensurado durante o dia, sem qualquer aclimação ao escuro, como descrita por Maxwell e Johnson (2000), tal parâmetro reflete o rendimento quântico efetivo (F_v'/F_m'), *i.e.*, a proporção de energia que realmente está sendo dirigida aos eventos fotossintéticos (BAKER, 2008).

Ambos F_0 e F_m podem ser obtidos com a folha adaptada à luz, e desta forma, tais parâmetros recebem a terminologia de F_0' e F_m' (GENTY, 1989). Com isso, é possível determinar o F_v'/F_m' , que reflete a quantidade de CRs que se encontram abertos, ou seja, a quantidade de Q_A oxidada passível de ser reduzida e sua eficiência em conduzir tal energia de excitação para os processos fotoquímicos (GENTY, 1989; BAKER, 2008).

Aranda et al. (2008) relataram que as taxas fotossintéticas em *Ilex aquifolium* em situações de seca são grandemente reduzidas, como resultado do fechamento estomático e limitações bioquímicas, demonstra também o efeito da luz em plantas submetidas a seca, em que plantas adaptadas a elevadas intensidades de luz possuem alta plasticidade fenotípica e

assim, maior adaptabilidade a seca. Grassi & Magnani (2005) estudando a resposta de árvores de carvalho observaram que a condutância estomática e mesofílica são responsáveis por até 75% das limitações impostas à fotossíntese em condições de seca. Em *Citrus*, a difusão do CO₂ até o sítio de carboxilação da Rubisco é regulada pela resistência estomática, respostas estas obtidas em quaisquer culturas (ERISMANN et al., 2007).

Tais resultados em plantas arbóreas demonstram que o comportamento estomático em relação à fotossíntese é universal não diferindo para aqueles encontrados em soja, como encontrado por Aliyev (2012) e Zheng et al. (2020). Ainda, a seca pode limitar em até 70% as trocas gasosas na cultura da soja, o que influencia em última instância, sua produtividade (RIBAS-CARBO et al., 2005). Assim, o estudo de estresses abióticos em plantas e a seleção de plantas geneticamente superiores baseando-se no seu potencial fotossintético frente ao déficit hídrico é uma solução segura para o melhoramento de plantas (BAKER, 2008). Ping et al. (2015), estudaram os efeitos progressivos da seca em árvores de maçã que sofreram privação de água durante 15 dias, e obtiveram a redução da condutância estomática e fotossíntese ao longo da seca, além disso, a eficiência no uso da luz pelos centros de reação do FSII foi reduzida, afetando assim as taxas fotossintéticas o que também explica as quedas na fotossíntese.

Li et al. (2015) também encontraram resultados interessantes por meio de variáveis fisiológicas, tais como taxa de assimilação de CO₂, fluorescência da clorofila *a* e análise de enzimas do estresse antioxidativo, quando avaliaram dois genótipos de tomate com tolerância diferencial à seca, e identificaram respostas diferenciadas de tolerância à seca. A resposta fotoprotetora de espécies de *Ficus* foi estudada a partir de tais parâmetros, e permitiu, dentre outros resultados, distinguir duas espécies, *Ficus racemosa* e *Ficus tinctoria* quanto à sua capacidade de tolerância à seca. Ainda, Zhang et al. (2016), estudaram o comportamento da soja submetida a estresses hídricos e lumínicos, e concluíram que um ajuste fisiológico no

metabolismo fotossintético permite a soja se adaptar e conviver com as secas e elevadas irradiâncias. Assim, o uso e aplicações das informações fornecidas pelas ferramentas fisiológicas, em especial fluorescência da clorofila *a*, são as mais diversas possíveis, permitindo o entendimento de diversas respostas metabólicas de plantas em respostas ao déficit hídrico (BAKER, 2008).

2.2.5. Índices Fisiológicos de Vegetação

A descoberta do perfil de absorção espectral das moléculas de clorofila permitiu o estudo de comprimentos de onda que são refletidos pelas folhas, que por sua vez, são correlacionados com o acúmulo de biomassa por parte das plantas, sendo assim, potenciais ferramentas para o melhoramento de plantas (BABAR et al., 2006). As técnicas atuais de estimativa do acúmulo de biomassa são em sua maioria destrutivas, laboriosas e quando são aplicadas ao longo do ciclo da cultura podem influenciar a mensuração de sua produtividade, uma vez que influenciam a área a ser colhida (BABAR et al., 2006). Desta forma, estimativas não destrutivas e de fácil aplicação e que permitam o monitoramento do crescimento vegetal em diversas condições estão sendo aplicadas e relatadas em diversas áreas da agronomia, tais como, fisiologia vegetal, melhoramento, fitopatologia, sensoriamento remoto, solos, etc. (CABRERA-BOSQUET et al., 2012; PIERUSCHKA et al., 2014; ZHOU et al., 2016).

Baseando-se nas informações contidas na reflectância espectral nos comprimentos de onda do visível (400-700 nm) (VIS) e do infravermelho (INV), índices de vegetação, tais como índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e índice de reflectância fotoquímica (PRI) (BABAR et al., 2006; PIERUSCHKA et al., 2014). O NDVI reúne informações contidas dos comprimentos de onda refletidos de ambos VIS e INV, Tucker e Sellers (1986) o definem como:

$$NDVI = \frac{R800 - R640}{R800 + R640}$$

Tal índice é um excelente indicador da quantidade de clorofila e da densidade da cobertura vegetal e possui inúmeras aplicações, desde o sensoriamento remoto, através do uso de imagens de satélites, ao uso na fenotipagem de plantas, utilizando-se sensores hiperespectrais, até o estudo *in situ* de pequenas parcelas (BABAR et al., 2006). Gutierrez et al. (2012), trabalhando com algodão, obtiveram que a determinação do NDVI foi capaz de explicar 87% da variância relacionada à biomassa da cultura e 47% da variância relacionada à produtividade da cultura. Eitel et al. (2008) encontraram elevadas correlações entre NDVI e a concentração de clorofilas nas folhas e com o índice de área foliar (IAF), demonstrando que tal metodologia pode ser empregada com sucesso na avaliação de diversos fatores limitantes tais como estresses bióticos e abióticos.

Ademais, a energia lumínica que, em condições normais seria direcionada para os processos fotossintéticos pode, em condições adversas ser dissipada por meio de outros processos metabólicos, um importante meio de dissipação desta energia é o ciclo das xantofilas (PEÑUELAS et al., 1995 e 1997). Em condições normais e quando a irradiância e temperatura diurna se encontram em níveis baixos, observa-se uma maior concentração de violaxantina, nas folhas, ao passo que, quando a temperatura e irradiância aumentam, a violaxantina é convertida em zeaxantina. Ambas são xantofilas, no entanto, a zeaxantina possui maior capacidade de dissipação de calor, e assim, quanto maior a concentração de zeaxantina, maior a energia liberada na forma de calor e assim, menor o rendimento fotoquímico da planta (PEÑUELAS et al., 1995 e 1997).

Portanto, existem assinaturas espectrais que correlacionam tal eficiência do metabolismo fotossintético, que convertem sinais espectrais em índices, como o PRI e NDVI (PEÑUELAS et al., 1995 e 1997). O PRI é obtido a partir da medição da reflectância (R) em comprimentos de onda na região do VIS (PEÑUELAS et al., 1995 e 1997; BABAR et al., 2006). A absorvância (A) A_{505} e A_{535} estão relacionadas às reações no ciclo das xantofilas antes relatadas e ainda, a

mudanças conformacionais em moléculas de xantofilas, proporcionando às plantas um efeito fotoprotetor, de forma a dissipar a energia absorvida na forma de calor (BABAR et al., 2006). De igual forma, as reflectâncias (R) nos comprimentos de onda de R₅₂₅ e R₅₃₉ fornecem as mesmas informações, demonstrando uma certa correlação entre eles, no entanto, segundo Peñuelas et al. (1995), essa assinatura espectral pode ser modificada pela morfologia, fisiologia e ainda, pelo ambiente em que a planta se encontra.

Por outro lado, segundo Peñuelas et al. (1995) todo tecido vegetal reflete o comprimento de onda de R₅₃₁, e desta forma, pode ser utilizado com segurança como um indicador dos processos fotossintéticos. Ademais, como um artefato para eliminar os efeitos da emissão de outras ondas de longas, foi adicionado ao cálculo do PRI a medição do comprimento de onda na faixa do R₅₇₀, assim, o cálculo de tal índice é realizado de forma semelhante ao NDVI, e segundo Peñuelas et al. (1995):

$$\text{PRI} = \frac{\text{R531} - \text{R570}}{\text{R531} + \text{R570}}$$

Kohzuma & Hikosaka (2016), trabalhando com *Arabidopsis thaliana* realizaram um importante trabalho na validação deste parâmetro em uma planta modelo mutante para vias dissipativas de calor que envolvem o ciclo das xantofilas. Neste trabalho, os autores comprovaram que tais plantas possuíam menores valores relacionados ao *quenching* de dissipação não fotoquímica (NPQ), e não eram eficientes na dissipação do excesso da energia lumínica por meio do calor. Desta forma, o uso de mutantes permitiu a validação deste índice, uma vez que os valores PRI foram fortemente correlacionados com os componentes do NPQ, de forma simples e objetiva.

Em condições de campo, o PRI tem sido testado como ferramenta ao sensoriamento remoto e diversos trabalhos relatam a excelente sensibilidade de tais satélites (ex. MODIS) em mensurar parâmetros relacionados à eficiência no uso da luz (SOUDANI et al., 2014). Ainda, o PRI tem sido utilizado com sucesso para a detecção de estresses nutricionais, hídricos e ainda,

para a fenotipagem em plantas (RAUN et al., 2001; SHRESTHA et al., 2012). Magney et al. (2016) também relatam que o PRI foi capaz de distinguir o estado de epoxidação dos pigmentos do ciclo das xantofilas em relação ao nível de água do solo, utilizando sensores de baixo custo e fixos, que acompanharam o crescimento do trigo em duas estações. Desta forma, a sensibilidade de tais sensores tem sido estudada a quilômetros de distância por meio de imagens de satélites e ainda, por meio de equipamentos que trabalham a distâncias de poucos metros (até 50 m) e podem ser empregados com extrema eficiência e com diversas finalidades, mas ainda demanda mais estudos, de modo que sua eficiência em se correlacionar com a produtividade seja a maior possível.

2.2.6. Fluorescência transiente induzida a luz (Light Induced Fluorescence Transient - LIFT)

O uso dos sensores fisiológicos não invasivos, não destrutivos e de alto rendimento que permitem a avaliação do potencial das culturas em acumular biomassa, potencial fotossintético e ainda, a eficiência no uso da água elevou a fenotipagem de plantas a um novo patamar (CABRERA-BOSQUET et al., 2012; ANJUM et al., 2016; CENDRERO et al., 2017). Através desses sensores, podem ser obtidas uma grande quantidade de informações em um curto espaço de tempo, e são avaliados diversos parâmetros fisiológicos relacionados ao crescimento e desenvolvimento de qualquer cultura de interesse, ainda, tornam possível avaliações ao longo do ciclo da cultura sem que a produtividade seja prejudicada (CABRERA-BOSQUET et al., 2012; CENDRERO et al, 2017).

Dentre estes, destacam-se aqueles que utilizam a metodologia da fluorescência transiente induzida a luz (LIFT). Tais equipamentos são capazes de obter medidas inerentes à eficiência operacional do fotossistema dois (F_q'/F_m'), indiretamente, e ainda, abarcar em sua plataforma, espectrômetros, capazes de mensurar índices de vegetação, como NDVI e PRI (PIERUSCHKA

et al., 2014; CENDRERO et al., 2017). Segundo Kolber et al. (2005), os primeiros protótipos do instrumento LIFT (LIFT-REM, Soliense Inc., New York, USA) utilizavam microflashes (com a quantidade variando de acordo com protocolo a ser utilizado, ver KELLER et al., 2018) de um LED, com poder de excitação de 125 W m^{-2} que proporciona $684 \mu\text{M Quanta m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Algumas centenas de microflashes eram então usadas para formar uma curva ou, um transiente, como descrito em Keller et al. (2018). Tal energia de excitação obtida pelos microflashes proporciona um aumento transiente na fluorescência, ou seja, sucessivos aumentos temporários, causados pelo retorno da Q_A ao seu estado basal, em sua forma oxidada, resulta na liberação da energia na forma de fluorescência (GENTY et al., 1989; KOLBER et al., 1998; KOLBER et al., 2005). Segundo Kolber et al. (2005), tal metodologia permite a análise a nível de dossel em alturas que chegam a 50 m, o que amplia o número de características possíveis de serem avaliadas.

O protocolo descrito por Keller et al. (2018) para formação de um “*pool*” de Q_A reduzida, utiliza cerca de 427 microflashes. Primeiramente, são aplicados 300 microflashes com uma elevada frequência de $1,6 \mu\text{s}$ por microflashe, durante esta fase de excitação. O F_0' é a fluorescência medida após o primeiro microflashe, já a fluorescência máxima, F_q' , é encontrada entre o microflashe 301 e 302, segundo Keller et al. (2018). Este ultimo indica o pico máximo de Q_A reduzida que voltando para seu estado basal, libera sua energia na forma de fluorescência. Desta forma, F_q'/F_m' é calculado como: $F_q'/F_m' = (F_{m \text{ FRR}'} - F_0) / F_{m \text{ FRR}'}$, em que $F_{m \text{ FRR}'}$ é a fluorescência máxima encontrada entre os microflashes 301 e 302, sua importância biológica está em mensurar a eficiência operacional dos FS (PIERUSCHKA et al., 2014; KELLER et al. 2018). Desta forma, em questão de segundos é possível avaliar a performance fotossintética de parcelas inteiras, aumentando substancialmente o número de indivíduos avaliados.

Existem outras metodologias de avaliação da performance fisiológica de plantas que, apesar de serem precisas, apresentam baixíssimo rendimento permitindo a análise de poucos

indivíduos (CENDRERO et al., 2017). Kolber et al. (2005) relataram que na análise da fluorescência de amplitude modulada, a mensuração de dados em distâncias de até 1m, permitindo a análise de uma ou poucas folhas, tal fluorescência é largamente utilizada abarcada em equipamentos tais como IRGA (Licor 6400XT Nebraska, EUA) e Mini-PAM (WALS, GERMANY). A grande diferença é que somente um pulso de saturação é aplicado à folha, de modo a criar um “*pool*” de Q_A reduzido, que ao retornar ao seu estado energético basal, liberará sua energia na forma de fluorescência, como descrito pelas curvas de Kautsky e Hirsch (1931), relatado em Maxwell e Johnson (2000) e outros muitos autores.

Desta forma, no IRGA, o número de amostras que se pode coletar de diferentes indivíduos é limitado a poucas folhas ou, uma ou duas plantas, de forma que aumentando-se o número de plantas amostradas, o tempo de avaliação demandado aumenta proporcionalmente (LONG et al., 2006; BAKER et al., 2008). Estas características não limitam o uso deste equipamento, mas tornam sua aplicabilidade em condições de campo menos atraentes, possibilitando assim o emprego de outros equipamentos e metodologias com vistas a preencher tais deficiências (CABRERA-BOSQUET et al., 2012).

2.2.7. Relações hídricas e comportamento isoídrico e anisoídrico

A água é uma das substâncias mais importantes e comumente encontrada na face da terra. Possui diversos usos e sua importância também ocorre em nível ecológico, uma vez que a precipitação pode definir diversas ecofisionomias e ainda, diversos tipos de vegetações, em que a presença da água será associada a maiores percentagens de umidade, menor efeito da temperatura e maior abundância de espécies (BRAUMAN et al., 2007; BERNACCHI; VANLOOCKE, 2015). A água é de fundamental importância para os processos fisiológicos dos tecidos vegetais, sendo um excelente solvente, que proporciona um grande tamponamento da temperatura pelo seu elevado calor específico, participa como doador de elétrons em diversas

reações e é responsável pelo transporte de nutrientes, processos respiratórios e fotossintéticos (KRAMER; BOYER, 1995).

O status hídrico indica a força que promove a locomoção da água de um local para outro, quando é expressa em unidade de pressão (i.e., KPa, MPa) é denominada de potencial hídrico (ψ_w), isto permite predizer o comportamento da água em diversas situações, tais como estresses salinos e hídricos (KRAMER; BOYER, 1995; ANDEREGG et al., 2018). O ψ_w pode ser descrito como sendo a soma dos potenciais de solutos, pressão, matricial e gravitacional:

$$\psi_w = \psi_s + \psi_p + \psi_m + \psi_g$$

Cada componente contribuirá no aumento ou diminuição do ψ_w e, desta forma, possuirá valores positivos (ex.: potencial de pressão e gravitacional, ψ_p e ψ_g respectivamente), ou ainda, poderá diminuir o ψ_w , possuindo assim valores negativos (ex.: potencial de solutos e matricial, $\psi_s + \psi_m$ respectivamente), determinando-se o ψ_w de um dado indivíduo. Tal sistema terá como comparação, a água pura e livre de quaisquer ligações a temperatura e pressão constantes e iguais ao sistema de interesse (KRAMER; BOYER, 1995).

Nos tecidos de células vegetais, o potencial gravitacional pode ser ignorado, pois somente passa a ter influência significativa a partir de 1m de altura, desta forma:

$$\psi_w = \psi_s + \psi_p + \psi_m$$

No entanto, em um conjunto de células, cada componente pode ser aplicado em duas situações distintas: o simplasto, ou seja, o interior celular e ainda, o apoplasto, o exterior celular. As relações hídricas somente para o interior celular, ou seja, o simplasto podem ser assim definidas como:

$$\psi_{w(s)} = \psi_{s(s)} + \psi_{p(s)}$$

O efeito matricial é ignorado, uma vez que não existem superfícies capazes de atrair a água no protoplasto reduzindo sua energia e com isto, seu potencial hídrico. Ainda, levando-se em consideração o apoplasto, o potencial hídrico pode ser expresso como:

$$\Psi_{w(a)} = \Psi_{s(a)} + \Psi_{m(a)}$$

Como o potencial de pressão que atua no apoplasto, é igual à pressão atmosférica, tal potencial pode ser desprezado. Assim, assume-se que o potencial hídrico no apoplasto e simplasto, em condições normais estão em equilíbrio, e desta forma, o $\Psi_{w(a)} = \Psi_{w(s)}$. portanto, pode-se afirmar que quaisquer mudanças dentro ou fora da célula podem desequilibrar esta igualdade. Em situações de seca, em que o potencial hídrico do solo é sobremaneira baixo e não há condições de se manter o apoplasto hidratado, uma vez que os potenciais de solutos e matricial são maiores, então, a célula reduz seu potencial hídrico, deslocando a água do protoplasto para o apoplasto, a favor de um gradiente de potencial hídrico. Em condições de seca alteram o potencial hídrico dos tecidos vegetais, que em resposta, o modificam-se para que um novo equilíbrio seja alcançado (KRAMER; BOYER, 1995).

As culturas que mantêm o Ψ_w da antemãnhã em condições adversas, como por exemplo, em resposta à seca, apresentam comportamento isoídrico e culturas que reduzem seu Ψ_w em resposta a depleção de água no solo apresentam comportamento anisoídrico (HOCHBERG, et al., 2017). Tal terminologia Iso/Anisoídrico, foi criada para descrever o comportamento do Ψ_w de plantas ao longo do dia, em relação ao status hídrico do solo.

Segundo Hochberg et al. (2017), plantas isoídricas além de manterem seu Ψ_w do meio dia e ante manhã constantes, regulam suas perdas de água através de uma fina regulação estomática; condições em que o Ψ_w do solo se encontram muito baixos, sinalizadores celulares, tais como o ABA, são enviados para a parte aérea e atuam junto às células-guarda dos estômatos, desta forma ocorre o rápido o fechamento estomático, mantendo o status hídrico (TARDIEU; SIMONNEAU, 1998), mesmo que o solo reduza seu Ψ_w , a planta continuará hidratada.

Por outro lado, plantas anisoídricas não possuem regulação hormonal, ou ainda, resposta hormonal integrada com sinalização hidráulica, desta forma, seu Ψ_w é grandemente afetado e dependem somente da resposta hidráulica (HOCHBERG et al., 2017). Estas plantas não

demonstram respostas de fechamento estomático imediato e seus estômatos continuam abertos, as células vegetais continuam a perder água para o ambiente e a formação de tensão no xilema é constante, uma vez que as taxas transpiratórias não cessam (TARDIEU; SIMONNEAU, 1998). Desta forma, a resposta anisódrica é relacionada à resposta mecânica em que normalmente são observados potenciais hídricos extremamente baixos.

2.3. SUBSTÂNCIAS SUPERABSORVENTES E CONDICIONANTES DE SOLO (SSA)

Devido às constantes mudanças climáticas, com a concentração das chuvas e eventuais secas em diversas partes do globo, diversos cientistas têm estudado o efeito da aplicação no solo de substâncias superabsorventes (SSA) como meio de permitir o crescimento vegetal em condições de extrema falta de água (BURKE et al., 2010). Essas SSA, como hidrogéis e ainda polímeros superabsorventes (PSA), podem absorver até 300% do seu peso em água e depois disponibilizar esta água em situações de déficit hídrico (BURKE et al., 2010). Além de reter água, estes PSA proporcionam a redução da densidade do solo permitindo maior penetração do sistema radicular, aumentam a agregação do solo e ainda, aumentam a retenção de nutrientes no solo (ABEDI-KOUPAI et al., 2008; OMIDIAN et al., 2005).

As SSAs podem ser classificadas como naturais, sintéticas e semissintéticas (ABEDI-KOUPAI et al., 2008). Segundo Mikkelsen (1994), os polímeros naturais são aqueles que possuem polissacarídeos, proteínas, ligninas e resíduos derivados de borracha e da indústria siderúrgica em sua composição. Um grande exemplo seria o uso de remineralizadores ou pó de rochas, que possuem grande quantidade de argilominerais em sua matriz e promovem aumento em sua capacidade de retenção de água. Os polímeros semissintéticos são aqueles oriundos da combinação de compostos naturais com sintéticos, como a mistura de celulose e petroquímicos como o éter de celulose. Já os sintéticos, grupo mais comumente comercializado, são compostos

por constituintes vinílicos e acrílicos, e são utilizados principalmente em culturas perenes, como o *Eucalyptus* sp. (MIKKELSEN, 1994; FILIPPE et al., 2016). Dentre estes, destacam-se os PSA sintéticos que possuem polaridade extremamente elevada, devido ao elevado número de grupos funcionais e, desta forma, absorvem quantidade grande de água e estes não se dissolvem em água, o que aumenta sua persistência no solo, e a sua contribuição na retenção de água em condições de seca (MIKKELSEN, 1994).

Existem muitos relatos dos efeitos positivos da aplicação destes compostos em condições controladas, em experimentos de casa-de-vegetação (MALEKIAN et al., 2012). Esses autores demonstraram a influência positiva destas SSAs, no crescimento das plantas, melhoria na capacidade de retenção de água por parte do substrato utilizado e produtividade da cultura do milho (*Zea mays*). No entanto, tais efeitos dependem da granulometria do polímero e ainda, do quanto a matriz do solo poderá potencialmente influenciar na capacidade total de retenção de água por tais PSAs (YU et al., 2017).

Além disso, pouco se sabe sobre o comportamento de polímeros na agricultura e as pesquisas são feitas em condições controladas e em poucas culturas de interesse econômico (YU et al., 2017). Para agravar a situação, tal tecnologia permanece com custos de aplicação elevados, o que tem deixado os agricultores reticentes em implementar tal tecnologia. Ademais, os prováveis efeitos de sua aplicação tanto ao solo quanto nos cultivos anuais permanecem obscuros e pelo fato de tais compostos apresentarem altíssima persistência no solo, permanece a incerteza de seus efeitos a longo prazo na microbiota dos solos (MIKKELSEN 1994; YU et al., 2017).

2.4. REMINERALIZADORES DE SOLO

Os remineralizadores de solo, comumente conhecidos como pós de rochas, são normalmente obtidos de brechas vulcânicas alcalinas, biotita-flogopitita xisto e rochas alcalinas

ultramáficas (THEODORO, 2006; THEODORO; LEONARDOS, 2006; RIBEIRO et al., 2010). O seu uso tem sido, em grande parte, como suplementação mineral, uma vez que as rochas utilizadas são fonte de nutrientes como magnésio, cálcio e potássio (THEODORO; LEONARDOS, 2006). Normalmente, após sua aplicação, a rocha pulverizada sofre o ataque dos microrganismos do solo e ainda, por exsudatos radiculares contidos na rizosfera tais como ácidos orgânicos, resultando na liberação de nutrientes (EHRlich, 1996; MAPELLI et al., 2012). Após um período de interação no solo, rotações com culturas como milho (SOUZA et al., 2017) e adubações regulares, existe então uma grande liberação de nutrientes que ao longo do tempo, podem eliminar a necessidade das tradicionais adubações minerais e ainda, fortalecer o comércio alternativo de fertilizantes nacionais (SOUZA et al., 2017). Desta forma, o pó de rocha pode ser uma alternativa viável para garantir uma certa independência de insumos externos, tornando a agricultura brasileira mais competitiva.

No Brasil, são inúmeros os trabalhos que relatam o resultado nutricional do fornecimento de pó de rocha tanto em relação à liberação de nutrientes quanto no potencial produtivo de culturas de interesse agrônômico. Em relação à liberação de nutrientes, Theodoro e Leonardos (2006) relatam que a suplementação com rochas ricas em fósforo, potássio, cálcio e magnésio, e ainda, afirmam que a construção da fertilidade a partir do rejuvenescimento do solo através da fertilização com pó de rochas pode garantir a produtividade de grandes culturas como milho, cana-de-açúcar, milho, mandioca e outras. Este trabalho, realizado em Minas Gerais pode ser corroborado com muitos outros, em outros estados, como em São Paulo (SOUZA et al., 2017) e Rio Grande do Sul (NUNES et al., 2014). No entanto, segundo Souza et al. (2017), a resistência encontrada na condução de experimentos de longo prazo, uso de materiais de matriz nutricional pobre e o próprio custo experimental, culminam em produzir resultados negativos e pouco explicativos, e em alguns casos, tem limitado a eficiência na coleta de dados inerentes a respostas produtivas de grandes culturas tratadas com o pó de rocha. Estes resultados negativos

podem estar relacionados a mineralogia do pó de rocha utilizado como descrito por STRAATEN (2006), manejo cultural a nível de campo com redução do intemperismo biótico (TOSCANI;CAMPOS, 2017) e ainda, experimentos de curtíssima duração que pouco contribuem para respostas conclusivas (SOUZA et al., 2017), mas a literatura concernente ao seu uso é controversa existindo também inúmeros casos de sucesso no Brasil e no exterior (LOPES et al., 2014; HELLAL et al., 2019).

Além de fornecer nutrientes essenciais ao desenvolvimento de quaisquer culturas, o pó de rocha possui em sua matrix, cerca de 80% de argilominerais e natureza de sua composição dependerá da formação geológica das rochas regionais (SOUZA et al., 2017). Entretanto, o condicionamento dos solos tem sido atrelado somente a seu aspecto nutricional e os efeitos da adubação frequente com pó de rocha e a possível capacidade de argilominerais em reter a água é frequentemente ignorada (WINIWATER; BLUM, 2008; RIBEIRO et al., 2010; MARTINS, 2010; SOUZA et al., 2016).

O efeito de expansão e contração de solos ricos em argilas pouco intemperizadas já é largamente relatado (BAILEY, 1969; BARONNET, 1978; LAGALY, 1981; ADAMS, 1983; CALLE, 1985; LIM; JACKSON,1986; FARMER, 1998; BEYER; REICHENBACH, H.G, 2001; CHRISTIDIS; EBERL, 2003; BARONNET; DEVOUARD, 2005; BUJDA, 2006; JOHNSTON, 2018), e as interações entre a água e as partículas de argila dependerão da natureza da superfície da argila e sua extensão, bem como substituições isomórficas que ocorrem devido ao intemperismo, ainda, do tipo de cátions trocáveis, da composição inônica da fase aquosa, tamanho e forma da partícula de argila e de forma geral, de sua porosidade (SOUZA et al., 2017). Assim, a importância dos argilominerais contidos no pó de rocha pode variar de acordo com a região, e os efeitos benéficos de retenção de água serão afetados de acordo com o material de origem (SOUZA et al., 2016). Mas ainda existem perguntas não respondidas, e o papel de condicionante do solo (SOUZA et al., 2017) através do fornecimento de argilominerais que

podem potencialmente contribuir como estratégia para mitigar os efeitos da seca permanece pouco esclarecido.

2.5. REFERÊNCIAS

ALIYEV, J.A. Photosynthesis, Photorespiration and Productivity of Wheat and Soybean Genotypes. **Physiologia Plantarum**, v.145, p.369-83, 2012.

ARCHIBALD, J.M. Endosymbiosis and eukaryotic cell evolution. **Current Biology**, v.25, p.911–921, 2015.

ADAMS, J.M. () Hydrogen atom positions in kaolinite by neutron profile refinement. **Clays and Clay Minerals**, v.31, p.352–356, 1983.

ABE, H.; URAO, T.; ITO, T.; SEKI, M.; SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. Arabidopsis AtMYC2 (bHLH) and AtMYB2 (MYB) Function as Transcriptional Activators in Abscisic Acid Signaling. **The Plant Cell**, v.15, p.63–78, 2003.

ALMEIDA, I.P.; CARPITA, N.C. Las B-Galactosidasas y la dinámica de la pared celular. **Interciência**, v.31, p.476-483, 2006.

ASSADA, K. The water-water cycle in chloroplasts: Scavenging of Active Oxygens and Dissipation of Excess Photons. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v.50, p.601-39, 1999.

AHSAN, M.M.; HAYWARD, A.; IRIHIMOVITCH, V.; FLETCHER, S.; TANURDZIC, M.; POCOCK, A.; BEVERIDGE, C.A.; MITTER, N. Juvenility and Vegetative Phase Transition in Tropical/Subtropical Tree Crops. **Frontiers in Plant Science**, v.10, p.1-13, 2019.

APHALO, P. J., & JARVIS, P. G. The boundary layer and the apparent responses of stomatal conductance to wind speed and to the mole fractions of CO₂ and water vapour in the air. **Plant, Cell and Environment**, v.16, p.771–783, 1993.

ANDEREGG, W.R.L.; WOLF, A.; ARANGO-VELEZ, A.; CHOAT, B.; CHMURA, D.J.; JANSEN, S.; THOMAS KOLB, T.; LI, S.; MEINZER, F.; PITA, P.; DIOS, V.R.; SPERRY, J.S.; WOLFE, B.T.; PACALA, S. Plant water potential improves prediction of empirical stomatal models. **PLOS ONE**, v.12, p.1-17, 2017.

ABEDI-KOUPAI, J.; SOHRAB, F.; SWARBRICK, G. Evaluation of Hydrogel Application on Soil Water Retention Characteristics. **Journal of Plant Nutrition**, v.31, p.318-331, 2008.

ARAÚJO, W.L.; ISHIZAKI, K.; NUNES-NESE, A.; LARSON, T.R.; TOHGE, T.; KRAHNERT, I.; WITT, S.; Obata, T.; SCHAUER, N.; GRAHAM, I.A.; Christopher J. LEAVER, C.J.; FERNIEA, A.R. Identification of the 2-Hydroxyglutarate and Isovaleryl-CoA Dehydrogenases as Alternative Electron Donors Linking Lysine Catabolism to the Electron Transport Chain of Arabidopsis Mitochondria. **The Plant Cell**, v.22, p.1549-1563, 2010.

BABAR, M.A.; REYNOLDS, M.P.; VAN GINKEL, M.; KLATT, A.R.; RAUN, W.R.; STONE, M.L. Spectral Reflectance to Estimate Genetic Variation for In-Season Biomass, Leaf Chlorophyll, and Canopy Temperature in Wheat. **Crop Science**, v.46, 1046-1057, 2006.

BLACK, R.J. Complexo soja: fundamentos, situação atual e perspectivas. In: CÂMARA, G.M.S. (Ed.). **Soja: tecnologia da produção II**. Piracicaba: ESALQ, LPV, 2000. p.1-18.

BLANKENSHIP, R.; CHEN, M. Spectral expansion and antenna reduction can enhance photosynthesis for energy production. **Current Opinion in Chemical Biology**, v.17, p.457-461, 2013.

BOARD, J.E.; KAHLON, C.S. Soybean Yield Formation: What Controls It and How It Can Be Improved. In: HANY A. EL-SHEMY (Ed). **Soybean Physiology and Biochemistry**, InTech, 2011, p.1-36.

BAKER, N.R. Chlorophyll Fluorescence: A Probe of Photosynthesis In Vivo. **Annual Review of Plant Biology**, v.59, p.89-113, 2008.

BAKER, D.N.; MYHRE, D.L. Effects of Leaf Shape and Boundary Layer Thickness on Photosynthesis in Cotton (*Gossypium hirsutum*). **Physiologia Plantarum**, v.22, p.1043-1049, 1969.

BATRA, N.G.; SHARMA, V.; KUMARIA, N. Drought-induced changes in chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, and thylakoid membrane proteins of *Vigna radiata*. **Journal of Plant Interactions**, v.9, p.712–721, 2014.

BUNCE, J.A. Use of a minimally invasive method of measuring leaf stomatal conductance to examine stomatal responses to water vapor pressure difference under field conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.139, p.335-343, 2006.

BURKE, D.R.; AKAY G.; BILSBORROW, P.E. Development of novel polymeric materials for agroprocess intensification. **Journal of Applied Polymer Science**, v.118, p.3292-3299, 2010.

BALDOCCHI, D. Measuring and modelling carbon dioxide and water vapour exchange over a temperate broad-leaved forest during the 1995 summer drought. **Plant, Cell and Environment**, v.20, p.1108-1122, 1997.

BRADBURY, M.; BAKER, N.R. Analysis of the slow phases of the in vivo chlorophyll fluorescence induction curve. Changes in the redox state of photosystem II electron acceptors and fluorescence emission from photosystems I and II. **Biochimica et Biophysica Acta**, v.635, p.542-551, 1981.

BRAUMAN, K.A.; DAILY, G.C.; DUARTE, T.K.; MOONEY, H.A. The Nature and Value of Ecosystem Services: An Overview Highlighting Hydrologic Services. **Annual Review of Environment and Resources**, v.32, p.1–32, 2007.

BERNACCHI, C.J.; VANLOOKE, A. Terrestrial Ecosystems in a Changing Environment: A Dominant Role for Water. **Annual Review of Plant Biology**, v.66, p.599–622, 2015.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **9º Levantamento da safra de brasileira de grãos**, safra 2019/2020. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>> Acesso em: 15 de junho de 2020.

BAILEY, S.W. Polytypism of trioctahedral 1:1 layer silicates. **Clays and Clay Minerals**, v.17, p.355–371, 1969.

BARONNET, A. Some aspects of polytypism in crystals. **Progress in Crystal Growth Characterization**, v.1, p.151–211, 1978.

BARONNET, A.; DEVOUARD, B. Microstructures of common polygonal serpentines from axial HRTEM imaging, electron diffraction, and lattice-simulation data. **The Canadian Mineralogist**, v.43, p.513–542, 2005.

BEYER, J.; VON REICHENBACH, H.G. An extended revision of the interlayer structures of one- and twolayer hydrates of Na-vermiculite. **Clay Minerals**, v.37, p.157–168, 2001.

BUJDÁK, J. Effect of the layer charge of clay minerals on optical properties of organic dyes. A review. **Applied Clay Science**, v.34, p.58–73, 2006.

CARDOSO, M.J.; MELO, F.B.; RIBEIRO, V.Q. Population density on cowpea cultivars with different growth habits in the matopiba region. **Revista Caatinga**, v.31, p.235–239, 2018.

CAIRES, E.F.; CHUEIRI, M.W.A.; E.F. AND FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira Ciência Solo**, v.22, p.27-34, 1998.

CENTRITTO, M.; LORETO, F.; CHARTZOULAKIS, K. The use of low [CO₂] to estimate diffusional and non-diffusional limitations of photosynthetic capacity of salt-stressed olive saplings. **Plant, Cell & Environment**, v.26, p.585-594, 2003.

CENDRERO, M.; PILAR, M.; MULLER, O.; ALBRECHT, H.; BURKART, A.; GATZKE, S.; JANSSEN, B.; KELLER, B.; KÖRBER, N.; KRASKA, T.; MATSUBARA, S.; LI, J.; MÜLLER-LINOW, M.; PIERUSCHKA, R.; PINTO, F.; RISCHBECK, P.; SCHICKLING, A.;

STEIER, A.; WATT, M.; SCHURR, U.; RASCHER, U. Field Phenotyping: Concepts and Examples to Quantify Dynamic Plant Traits across Scales in the Field. In: CHABBI, A.; LOESCHER, H.W. (Ed.). **Terrestrial Ecosystem Research Infrastructures: Challenges and Opportunities**. CRC Pres, p.53-79, 2017.

CATTELAN, A.J.; DALL'AGNOL, A. The rapid soybean growth in Brazil. **Oilseeds & fats Crops and Lipids**, v.25, p.1-12, 2018.

CABRERA-BOSQUET, L.; CROSSA, J.; VON ZITZEWITZ, J.; SERRET, M.D.; ARAUS, J.L. High-throughput Phenotyping and Genomic Selection: The Frontiers of Crop Breeding Converge. **Journal of Integrative Plant Biology**, v.54, p.312-320, 2012.

CHRISTIDIS, G.E.; EBERL, D.D. Determination of layer charge characteristics of smectites **Clays and Clay Minerals**, v.51, p.644–655, 2003.

COUTINHO, I.D.; HENNINGB, L.M.M.; DÖPPC, S.A.; NEPOMUCENO, A.; MORAES, L.A.C.; MARCOLINO-GOMES, J.; RICHTERC, C.; SCHWALBEC, H.; COLNAGOA, L.A. Flooded soybean metabolomic analysis reveals important primary and secondary metabolites involved in the hypoxia stress response and tolerance. **Environmental and Experimental Botany**, v.153, v.176–187, 2018.

DETMANN, K.C.; ARAÚJO, W.L.; MARTINS, S.C.V.; SANGLARD, L.M.V.P.; REIS, J.V.; DETMANN, E.; RODRIGUES, F.A.; NUNES-NESE A.; FERNIE, A.R.; DAMATTA, F.M. Silicon nutrition increases grain yield, which, in turn, exerts a feed-forward stimulation of photosynthetic rates via enhanced mesophyll conductance and alters primary metabolism in rice. **New Phytologist**, v.196, p.752-762, 2014.

DEKKERA, J.P.; BOEKEMA, E.J. Supramolecular organization of thylakoid membrane proteins in green plants. **Biochimica et Biophysica Acta**, v.1706, p.12-39, 2005.

DE LA CALLE, C.; SUQUET, H.; PEZERAT, H. Vermiculites hydratees a une couche. **Clay Minerals**, v.20, p.221–230. 1985.

ENGELS, C.; RODRIGUES, F.A.; FERREIRA, A.O.; INAGAKI, T.M.; NEPOMUCENO, A.L. Drought Effects on Soybean Cultivation - A Review. **Annual Research & Review in Biology**, v.16, p.1-13, 2017.

EVANS, J. R.; POORTER, H. Photosynthetic acclimation of plants to growth irradiance: the relative importance of specific leaf area and nitrogen partitioning in maximizing carbon gain. **Plant, Cell and Environment**, v.24, p.755-767, 2001.

ENGINEER, C.B.; HASHIMOTO-SUGIMOTO, M.; NEGI, J.; ISRAELSSON-NORDSTRÖM, M.; AZOULAY-SHEMER, T.; RAPPEL, W.J.; IBA, K.; SCHROEDER, J. CO₂ Sensing and CO₂ Regulation of Stomatal Conductance: Advances and Open Questions. **Trends in Plant Science**, v.21, p.16-31, 2016.

EITEL, J.U.H.; LONG, D.S.; GESSLER, P.E.; HUNT, E.R. Combined Spectral Index to Improve Ground-Based Estimates of Nitrogen Status in Dryland Wheat. **Agronomy Journal**, v.100, p.1694-1702, 2008.

ELLIOTT, R.E.; PLATTEN J.D.; WATSON, J.C.; REID, J.B. Phytochrome regulation of pea phototropin. **Journal of Plant Physiology**, v.161, p.265–270, 2004.

EVANS, J.R.; KALDENHOFF, R.; GENTY, B.; TERASHIMA, I. Resistances along the CO₂ diffusion pathway inside leaves. **Journal of Experimental Botany**, v.60, p.2235–2248, 2009.

EMERSON, R.; RABINOWITCH, E. Red drop and role of auxiliary pigments in photosynthesis. **Plant Physiology**, v.35, p.1-9, 1960.

EHRlich, H.L. How microbes influence growth and dissolution. **Chemical Geology**, v.132, p.5–9, 1996.

FAHAD, S.; BAJWA, A.A.; NAZIR, U.; ANJUM, S.A.; FAROOQ, A.; ZOHAIB, A.; SADIA, S.; NASIM, W.; ADKINS, S.; SAUD, S.; IHSAN, M.Z.; ALHARBY, H.; WU, C.; WANG, D.; HUANG, J. Crop Production under Drought and Heat Stress: Plant Responses and Management Options. **Frontiers in Plant Science**. v.8, p.1-17, 2017.

FARQUHAR, G.D.; VON CAEMMERER, S.; BERRY, J.A. A Biochemical Model of Photosynthetic CO₂ Assimilation in Leaves of C₃ Species. **Planta**, v.149, p.78-90, 1980.

FARIAS, J.R.B.; NEPONUCENO, A.L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da Soja**. Circular Técnica 48, Londrina-PR, 2007.

FLEXAS, J.; MEDRANO, H. Drought inhibition of Photosynthesis i C₃ Plants: Stomatal and Non-Stomatal Limitations Revisited. **Annals of Botany**, v.89, p.183-189, 2002.

FARMER, V.C. Differing effect of particle size and shape in the infrared and Raman spectra of kaolinite. **Clay Minerals**, v.33, p.601–604, 1998.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E.; BURMOOD, D.T.; PENNINGTON, J.S. Stage of development descriptions for soybeans, (L) Merrill. **Crops Science**, v.11, p.929-931, 1971.

GARNER, W.W. Comparative responses of long-day and short-day plants to relative length of day and night. **Plant Physiology**, v.8, p.387-356, 1933.

GAVASSI, M.A.; MONTEIRO, C.C.; CAMPOS, M.L.; MELO, H.C.; CARVALHO, R.F. Phytochromes are key regulators of abiotic stress responses in tomato. **Scientia Horticulturae**, v.222, p.126-135, 2017.

GALMÉS, J.; MEDRANO, H.; FLEXAS, J. Photosynthetic limitations in response to water stress and recovery in Mediterranean plants with diferente growth forms. **New Phytologist**, v.175, p.81-93, 2007.

GOTTARDINI, E.; CRISTOFORI, A.; CRISTOFOLINI, F.; NALI, C.; PELLEGRINI, E.; BUSSOTTI, F.; FERRETTI, M. Chlorophyll-related indicators are linked to visible ozone symptoms: Evidence from a field study on native *Viburnum lantana* L. plants innorthern Italy. **Ecological Indicators**, v.39, p.65-74, 2014.

GENTY, B.; BRIANTAIS, J.M.; BAKER, N.R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects**, v.990, p.87-92, 1989.

GOVINDJEE. Chlorophyll a Fluorescence: A Bit of Basics and History. In: PAPAGEORGIU, G.C.; GOVINDJEE (Ed.). **Chlorophyll Fluorescence: A Signature of Photosynthesis**. Kluwer Academic Publishers, Printed in The Netherlands, p.1–42, 2004.

GUTIERREZ, M.; NORTON, R.; THORP, K.R.; WANG, G. Association of Spectral Reflectance Indices with Plant Growth and Lint Yield in Upland Cotton. **Crop Science**, v.52, p.849-857, 2012.

GARCIA-MOLINA, A.; LEISTER, D. Accelerated relaxation of photoprotection impairs biomass accumulation in Arabidopsis. **Nature Plants**, v.6, p.9–12, 2020.

GUSSO, A.; DUCATI, J.R.; BORTOLOTTI, V.C. Analysis of soybean cropland expansion in the southern Brazilian Amazon and its relation to economic drivers. **Acta Amazonica**, v.47, p.281-292, 2017.

HUSSAIN, M.; MALIK, M.A.; FAROOQ, M.; ASHRAF, M.Y.; CHEEMA, M.A. Improving drought tolerance by exogenous application of glycinebetaine and salicylic acid in sunflower. **Journal Agronomic Crop Science**, v.194, p.193–199, 2008.

HAN, T.; WU, C.; TONG, Z.; MENTREDDY, R.S.; TANC, K.; GAI, J. Postflowering photoperiod regulates vegetative growth and reproductive development of soybean. **Environmental and Experimental Botany**, v.55, p.120–129, 2006.

HA, T.M. A Review of Plants' Flowering Physiology: The control of floral induction by juvenility, temperature and photoperiod in annual and ornamental crops. **Asian Journal of Agriculture and Food Science**, v.2, p.186-195, 2014.

HABERMANN, G.; MACHADO, E.C.; RODRIGUES, J.D.; MEDINA, C.L. CO₂ assimilation, photosynthetic light response curves, and water relations of 'Pêra' sweet orange plants infected with *Xylella fastidiosa*. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v15, p.79-87, 2003.

HOCHBERG, U.; ROCKWELL, F.E.; HOLBROOK, N.M.; COCHARD, H. Iso/Anisohydry: A Plant Environment Interaction Rather Than a Simple Hydraulic Trait. **Trends in Plant Science**, v.23, p.1-9, 2017.

HU, H.; BOISSON-DERNIER, A.; ISRAELSSON-NORDSTRÖM, M.; BÖHMER, M., XUE, S.; RIES, A.; GODOSKI, J.; KUHN, J.M.; SCHROEDER, J.I. Carbonic anhydrases are upstream regulators of CO₂-controlled stomatal movements in guard cells. **Nature Cell Biology**, v.12, p.87–93, 2010.

HATURVEDI, R.; HYAM, A. Degradation and de novo synthesis of D1 protein and psbA transcript in reinhardtii during UV-B inactivation of photosynthesis. **Journal of Bioscience**, v.25, p.65–71, 2000.

HELLAL, F.; EL-SAYED, S.; ZEWAINY, R.; AMER, A. Importance of phosphate rock application for sustaining agricultural production in Egypt. **Bulletin of the National Research Centre**, v. 43, p.1-11, 2019.

JAMES E.; PALLAS, Jr. Mechanisms of Guard Cell Action. **The Quarterly Review of Biology**, v.41, pp. 365-383, 1966.

JOHNSON, M.P. Photosynthesis. **Essays in Biochemistry**, v.60, p.255–273, 2016.

JOHNSTON, C.T. Clay mineral–water interactions. In: SCHOONHEYDT, R.; JOHNSTON, C.T.; BERGAYA, F. (Ed.). **Surface and Interface Chemistry of Clay Minerals**. Developments in Clay Science, v.9, p.89-124, 2018.

KOLBER, Z.; KLIMOV, D.; ANANYEV, G.; RASCHER, U.; BERRY, J.; OSMOND, B. Measuring photosynthetic parameters at a distance: laser induced fluorescence transient (LIFT) method for remote measurements of photosynthesis in terrestrial vegetation. **Photosynthesis Research**, v.84, p.121–129, 2005.

KOLBER, Z.S.; PRÁŠIL, O.; FALKOWSKI, P.G. Measurements of variable chlorophyll fluorescence using fast repetition rate techniques: defining methodology and experimental protocols. **Biochimica et Biophysica Acta**, v.1367, p.88-106, 1998.

KRAMER, P.J.; BOYER, J.S. 1.ed. **Water relations of plants and soils**. San Diego: Academic, 1995. 404p.

KERSTIENS, G. Stomatal Response to Leaf-to-Air Humidity Gradient: A Comparison of Models. **Physics and Chemistry of the Earth**, v.23, p.439-442, 1998.

KRAUSE, G.H., WEIS, E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis the basics. **Annual review of plant physiology and plant molecular biology**, v.42, p.313-349, 1991.

KOHZUMA, K.; HIKOSAKA, K. Physiological validation of photochemical reflectance index (PRI) as a photosynthetic parameter using Arabidopsis thaliana mutants. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, v.498, p.52-57, 2018.

KUME, A. Importance of the green color, absorption gradient, and spectral absorption of chloroplasts for the radiative energy balance of leaves. **Journal of Plant Research**, v.130, p.501–514, 2017.

KELLER, B.; VASS, I.; MATSUBARA, S.; PAUL, K.; JEDMOWSKI, C.; PIERUSCHKA, R.; NEDBAL, L.; RASCHER, U.; MULLER, O. Maximum fluorescence and electron transport kinetics determined by light-induced fluorescence transients (LIFT) for photosynthesis phenotyping. **Photosynthesis Research**, v.140, p.221-233, 2018.

KAUTSKY, H.; HIRSCH, A. Neue Versuche zur Kohlensäureassimilation. **Naturwissenschaften**, v.19, p.964-964, 1931.

KEREN, N.; PALTIEL, Y. Photosynthetic Energy Transfer at the Quantum/Classical Border. **Trends in Plant Science**, v.23, p.1-10, 2018.

LONG, S.P.; FARAGE, P.K.; GARCIA, R.L. Measurement of leaf and canopy photosynthetic CO₂ exchange in the field. **Journal of Experimental Botany**, v.47, p.1629-1642, 1996.

LIPIEC, J.; DOUSSAN, C.; NOSALEWICZ, A.; KONDRACKA, K. Effect of drought and heat stresses on plant growth and yield: a review. **International Agrophysics**, v.27, p.463-477, 2013.

LIU, X.; RAHMANA, T.; SONG, C.; SUD, B.; YANGA, F.; YONG, T.; WU, Y.; ZHANG, C.; YANG, W. Changes in light environment, morphology, growth and yield of soybean in maize-soybean intercropping systems. **Field Crops Research**, v.200, p.38–46, 2017.

LIA, Y.; ZHANGA, Y.; LIA, M.; LUO, Q.; MALLANOD, A.I.; JINGA, Y.; ZHANGA, Y.; ZHAO, L.; LI, W. GmPLP1, a PAS/LOV protein, functions as a possible new type of blue light photoreceptor in soybean. **Gene**, v.645, p.170-178, 2018.

LI, J.; CANG, Z.; JIAO, F.; BAI, X.; ZHANG, D.; ZHAI, R. Influence of drought stress on photosynthetic characteristics and protective enzymes of potato at seedling stage. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v.16, p.82–88, 2017.

LAHIRI, M. (). Wave-particle duality and polarization properties of light in single-photon interference experiments. **Physical Review A**, v.83, p.1-3, 2011.

LICHTENTHALER, H.K. Biosynthesis, accumulation and emission of carotenoids, a-tocopherol, plastoquinone, and isoprene in leaves under high photosynthetic irradiance. **Photosynthesis Research**, v.92, p.163–179, 2007.

LAGALY, G. Characterization of clays by organic compounds. **Clay Minerals**, v.16, p.1–21, 1981.

LIM, C.H.; JACKSON, M.L. Expandable phyllosilicate reactions with lithium on heating, **Clays and Clay Minerals**, v.34, p.346–352, 1986.

Lopes, O.M.M.; Carrilho, E.N.V.M.; Lopes-Assad, M.L.R.C. Effect of rock powder and vinasse on two types of soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1547-1557, 2014.

MATIU, M.; ANKERST, D.P.; MENZEL, A. Interactions between temperature and drought in global and regional crop yield variability during 1961-2014. **Plos One**, v.xx, p.1-23, 2017.

MIKKELSEN, R. Using hydrophilic polymers to control nutrient release. **Fertilizer Research**, v.38, p.53-59, 1994.

MAROM, Z.; SHTEIN, I.; BAR-ON, B. Stomatal Opening: The Role of Cell-Wall Mechanical Anisotropy and Its Analytical Relations to the Bio-composite Characteristics. **Frontiers in Plant Science**, v.8, p.2061, 2017.

MINER, G.L.; BAUERLE, W.L.; BALDOCCHI, D.D. Estimating the sensitivity of stomatal conductance to photosynthesis: a review. **Plant, Cell and Environment**, v.40, p.1214-1238, 2016.

MIYASAKA, S.; MEDINA, J.C. **A Soja no Brasil**, 1977, 274p.

MARCANO-MARTINEZ, E.; MCBRIDE, M. B. Calcium and Sulfate Retention by Two Oxisols of the Brazilian Cerrado. **Soil Science Society of America Journal**, v.53, p.63-69, 1989.

MAXWELL, K.; JOHNSON, G.N. Chlorophyll fluorescence - a practical guide. **Journal of Experimental Botany**, v.51, p.659-668, 2000.

MALEKIAN, A.; VALIZADEH, E.; DASTOORI, M.; SAMADI, S.; BAYAT, V. Soil water retention and maize (*Zea mays* L.) growth as affected by different amounts of Pumice. **Australian Journal of Plant Science**, v.6, p.450-454, 2012.

MAGNEY, T.S.; VIERLING, L.A.; EITEL, J.U.H.; HUGGINS, D.R.; GARRITY, S.R. Response of high frequency Photochemical Reflectance Index (PRI) measurements to environmental conditions in wheat. **Remote Sensing of Environment**, v.173, p.84-97, 2016.

MORR, K.A. Do Stomata Respond to CO₂ Concentrations Other than Intercellular? **Plant Physiology**, v.86, p.200-203, 1988.

McCREE, K.J. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. **Agricultural Meteorology**, v.9, p.191-216, 1972.

McFARLANEA, C.R.; SHAHA, N.R.; KABASAKALA, B.V.; BECHEVERRIAA, B.; COTTONA, C.A.R.; BUBECKA, D.; MURRAY, J.W. Structural basis of light-induced redox regulation in the Calvin–Benson cycle in cyanobacteria. **PNAS**, v.116, p.20984–20990, 2019.

MÜLLER-LINOW, M.; PINTO-ESPINOSA, F.; SCHARR, H.; RASCHER, U. The leaf angle distribution of natural plant populations: assessing the canopy with a novel software tool. **Plant Methods**, v.11, p.1-11, 2015.

MORIYAMA, T.; SATO, N. Enzymes involved in organellar DNA replication in photosynthetic eukaryotes. **Frontiers in Plant Science**, v.5, p.480-492, 2014.

MAPELLIA, F.; MARASCOA, R.; BALLOI, A.; ROLLI, E.; CAPPITELLI, F.; DAFFONCHIOA, D.; BORINA, S. Mineral–microbe interactions: Biotechnological potential of bioweathering. **Journal of Biotechnology**, v.157, p.473–481, 2012.

MARTINS, E.S.; RESENDE, A.V.; OLIVEIRA, C.G.; FURTINI NETO, A.E. Materiais silicáticos como fontes regionais de nutrientes e condicionadores de solos. In: F.R.C. Fernandes; A.B. da Luz; Z.C. Castilhos. (Org.). **Agrominerais para o Brasil**. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ: CETEM, 2010, v.1, p. 89-104.

MIAO, C.; LI, X.X.; LEE, Y.M.; XIA, C.; WANG, Y.; NAM, W.; WEI SUN, W. Manganese complex-catalyzed oxidation and oxidative kinetic resolution of secondary alcohols by hydrogen peroxide. **Chemical Science**, v.8, p.7476–7482, 2017.

MINUZZI, R.B.; FREDERICO, C.A.; SILVA, T.G.F. Estimation of soybean agronomic performance in climatic scenarios for Southern Brazil. **Revista Ceres**, v.64, p.567-573, 2017.

NICO, M.; MIRALLES, D.J.; KANTOLIC, A.G. Post-flowering photoperiod and radiation interaction in soybean yield determination: Direct and indirect photoperiodic effects. **Field Crops Research**, v.176, p.45-55, 2015.

NIELSEN, A.Z.; ZIERSEN, B.; JENSEN, K.; LASSEN, L.M.; OLSEN, C.E.; MØLLER, B.L.; JENSEN, P.E. Redirecting Photosynthetic Reducing Power toward Bioactive Natural Product Synthesis. **ACS Synthetic Biology**, v.6, p.308–315, 2013.

NEUHAUS, G.; BOWLER, C.; KERN, R.; CHUAT, N. Calcium/Calmodulin-Dependent and -Independent Phytochrome Signal Transduction Pathways. **Cell**, v.73, p.937-952, 1993.

NUNES-NESI, A.; DANIELLE SANTOS BRITO, D.S.; INOSTROZA-BLANCHETEAU, C.; FERNIE, A.R.; ARAÚJO, W.L. The complex role of mitochondrial metabolism in plant aluminum resistance. **Trends in Plant Science**, v.19, p.399-407, 2014.

NAJAFPOUR, M.M.; ISALOO, M.A.; JULIAN J. EATON-RYE, J.J.; TOMO, T.; NISHIHARA, H.; SATOH, K.; CARPENTIER, R.; SHEN, J.R.; ALLAKHVERDIEV, S.I. Water exchange in manganese-based water-oxidizing catalysts in photosynthetic systems: From the water-oxidizing complex in photosystem II to nano-sized manganese oxides. **Biochimica et Biophysica Acta**, v.1837, p.1395–1410, 2014.

OGREN, E.; EVANS, J.R. Photosynthetic light-response curves. The influence of CO₂ partial pressure and leaf inversion. **Planta**, v.189, p.182-190, 1993.

OUZOUNIS, T.; ROSENQVIST, E.; CARL-OTTO OTTOSEN, C. O. Spectral Effects of Artificial Light on Plant Physiology and Secondary Metabolism: A Review. **Horticultural Science**, v.50, p.1128–1135, 2015.

OMIDIAN, H.; ROCCAA, J.G.; PARK, K. Advances in superporous hydrogels. **Journal of Controlled Release**, v.102, p.3-12, 2005.

OYA, T.; NEPOMUCENO, A.L.N.; NEUMAIER, N.; José Renato Bouças Farias, J.R.B.F.; Tobita, S.; Ito, O. Drought tolerance characteristics of brazilian soybean cultivars evaluation and characterization of drought tolerance of various brazilian soybean cultivars in the field. **Plant Production Science**, v.7, p.129-137, 2004.

PAGANO, M.; MIRANSARI, M. **The importance of soybean production worldwide**. In: MIRANSARI M. (Ed.). **Abiotic and Biotic Stresses in Soybean Production**. 1.ed. Academic Press, 2016, p.1-26.

PESSARAKLI, M. **Handbook of Photosynthesis**. 2.ed. Taylor & Francis, 2005. 883p.

PING, M.A.; TUAN-HUI, B.A.I.; FENG-WANG, M.A. Effects of progressive drought on photosynthesis and partitioning of absorbed light in apple trees. **Journal of Integrative Agriculture**, v.14, p.681–690, 2015.

PERKS, M.P.; IRVINE, J.; GRACE, J. Canopy stomatal conductance and xylem sap abscisic acid (ABA) in mature Scots pine during a gradually imposed drought. **Tree Physiology**, v.22, p.877–883, 2002.

PERI, P.L.; MOOTA, D.J.; MCNEIL, D.L. Modelling photosynthetic efficiency (α) for the light-response curve of cocksfoot leaves grown under temperate field conditions. **European Journal of Agronomy**, v.xx, p.1-12, 2004.

PEÑUELAS, J.; EILALLA, I.; GAMON, J.A. Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance. **New Phytologist.**, v.131, p.291-296, 1995.

PEÑUELAS, J.; FILELLA, I.; BIEL C.; SERRANO R.; SAVÉ, R. The reflectance at the 950-970nm region as an indicator of plant water status. **International Journal of Remote Sensing**, v.14, P.1887-1905, 1993.

PEÑUELAS, J.; FILELLA, I.; GAMON, J.A.; FIELD, C. Assessing photosynthetic radiation-use efficiency of emergent aquatic vegetation from spectral reflectance. **Aquatic Botany**, v.58, p.307-315, 1997.

PIERUSCHKA, R.; ALBRECHT, H.; MULLER, O.; BERRY, J.A.; KLIMOV, D.; KOLBER, Z.S.; MALENOVSKÝ, Z.; RASCHER, U. Daily and seasonal dynamics of remotely sensed photosynthetic efficiency in tree canopies. **Tree Physiology** v.00, p.1–12, 2014.

PIERUSCHKA, R.; KLIMOV, D.; KOLBER, Z.S.; BERRY, J.A. Monitoring of cold and light stress impact on photosynthesis by using the laser induced fluorescence transient (LIFT) approach. **Functional Plant Biology**, v.37, p.395–402, 2010.

PEREIRA, L.F.; MARTINS, S.C.V.; AUCIQUE-PÉREZ, C.E.; SILVA, E.T.; ÁVILA, R.T.; DAMATTA, F.M.; RODRIGUES, F.A. Silicon alleviates mesophyll limitations of photosynthesis on rice leaves infected by *Monographella albescens*. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v.32, p.163–174, 2020.

PRIBIL, M.; MATHIAS LABS, M.; LEISTER, D. Structure and dynamics of thylakoids in land plants. **Journal of Experimental Botany**, v.65, p.1955–1972, 2014.

RAY, D.K.; GERBER, J.S.; MACDONALD, G.K.; WEST, P.C. Climate variation explains a third of global crop yield variability. **Nature Comunitations**, v.22, p.1-9, 2015.

ROLLINS, J.A.; HABTE, E.; TEMPLER, S.E.; COLBY, T.; SCHMIDT, J.; VON KORFF, M. Leaf proteome alterations in the context of physiological and morphological responses to drought and heat stress in barley (*Hordeum vulgare* L.). **Journal of Experimental Botany**, v.64, p.3201–3212, 2013.

RITCHEY, K.D.; SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E.; CORREA, O. Calcium Leaching to Increase Rooting Depth in a Brazilian Savannah Oxisolt. **Agronomy Journal**, v.72, p.40-44, 1980.

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**. Special Report, p.1977, 20p.

ROBBINS, N.S.; PHARR, D.M. Regulation of Photosynthetic Carbon Metabolism in Cucumber by Light Intensity and Photosynthetic Period. **Plant Physiology**, v.85, 592–597, 1987.

ROHÁČEK, K.; SOUKUPOVÁ, J.; BARTÁK, M. Chlorophyll fluorescence: A wonderful tool to study plant physiology and plant stress. In: SCHOEFS, B. (Ed.). **Plant Cell Compartments-Selected Topics**, 2008, p.41-104.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; LUKINA, E.V.; THOMASON, W.E.; SCHEPERS, J.S. In-Season Prediction of Potential Grain Yield in Winter Wheat Using Canopy Reflectance. **Agronomy Journal**, v.93, p.131-138, 2001.

ROBERTI, J.A.; SANCLEMENTS, M.D.; LOESCHER, H.W.; AYRES, E. Traceable Calibration, Performance Metrics, and Uncertainty Estimates of Minirhizotron Digital Imagery for Fine-Root Measurements. **PLOS ONE**, v.9, p.1-12, 2014.

ROCHAIX, J.D. Regulation of photosynthetic electron transport. **Biochimica et Biophysica Acta**, v.1807, p.375–383, 2011.

RIBEIRO, L.S; SANTOS, A.R.; SOUZA, L.F.S.; SOUZA, J.S. Rochas silicáticas portadoras de potássio como fontes do nutriente para as plantas solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 34, p. 891-897, 2010.

REITER, B.; VAMVAKA, E.; MARINO, G.; KLEINE, T.; JAHNS, P.; BOLLE, C.; LEISTER, D.; RÜHLE, T. The Arabidopsis Protein CGL20 Is Required for Plastid 50S Ribosome Biogenesis. **Plant Physiology**, v. 182, p.1222–1238, 2020.

RÜHLE, T.; REITER, B.; LEISTER, D. Chlorophyll Fluorescence Video Imaging: A Versatile Tool for Identifying Factors Related to Photosynthesis. **Frontiers in Plant Science**, v.9, p.1-13, 2018.

SATO, N. Complex origins of chloroplast membranes with photosynthetic machineries: multiple transfers of genes from divergent organisms at different times or a single endosymbiotic event? **Journal of Plant Research**, v.133, p.15–33, 2020.

SAMARAH, N. H.; MULLEN, R.E.; CIANZIO, S. R.; SCOTT, P. Dehydrin-Like Proteins in Soybean Seeds in Response to Drought Stress during Seed Filling. **Crop Science**, v.46, p.2141–2150, 2006.

SEDIYAMA, T. **Tecnologias de produção e usos da soja**. 1.ed. Londrina: Ed. Mecenas, 2009, 314p.

SINGH, A.; GANAPATHYSUBRAMANIAN, B.; SINGH, A.K.; SARKAR, S. Machine Learning for High-Throughput Stress Phenotyping in Plants. **Trends in Plant Science**, v.21, p.110-124, 2016.

SOUDANI, K.; HMIMINA, G.; DUFRÊNE, E.; BERVEILLER, D.; DELPIERRE, N.; OURCIVAL, J.M.; RAMBAL, S.; JOFFRE, R. Relationships between photochemical reflectance index and light-use efficiency in deciduous and evergreen broadleaf forests. **Remote Sensing of Environment**, v.144, p.73-84, 2014.

SHRESTHA, S.; BRUECK, H.; ASCH, F. Chlorophyll index, photochemical reflectance index and chlorophyll fluorescence measurements of rice leaves supplied with different N levels. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v.113, p.7-13, 2012.

SAMPOL, B.; BOTA, J.; RIERA, D.; MEDRANO, H.; FLEXAS, J. Analysis of the virus-induced inhibition of photosynthesis in malmsey grapevines. **New Phytologist**, v.160, p.403–412, 2003.

SABATER, B. Evolution and Function of the Chloroplast. Current Investigations and Perspectives. **International Journal of Molecular Sciences**, v.19, p.1-5, 2018.

SEMENOVA, G.A. The thylakoid membrane in a wide pH range. **Journal of Plant Physiology**, v.159, p.613–625, 2002.

SEMER, J.; ŠTROCH, M.; ŠPUNDA, V.; NAVRÁTIL, M. Partitioning of absorbed light energy within photosystem II in barley can be affected by chloroplast movement. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v.186, p.98–106, 2018.

SAGE, R.F. A Model Describing the Regulation of Ribulose-1,5-Bisphosphate Carboxylase, Electron Transport, and Triose Phosphate Use in Response to Light Intensity and CO₂ in C₃ Plants. **Plant Physiology**, v.94, p.1728-1734, 1990.

SHIMIZU, R.; DEMPO, Y.; NAKAYAMA, Y.; NAKAMURA, S.; BAMBIA, T.; FUKUSAKI, E.; FUKUI, T. New Insight into the Role of the Calvin Cycle: Reutilization of CO₂ Emitted through Sugar Degradation. **Scientific Reports**, v.5, p.1-12, 2015.

SCHERTL, P.; BRAUN, H.P. Respiratory electron transfer pathways in plant mitochondria. **Front Plant Science**, v.5, p.1-11, 2014.

SOUZA, M.D.B.; FONTANETTI, A.; ASSAD, M.L.R.C.L. Efeito de remineralizador, vinhaça e plantas de cobertura nos atributos químicos do solo. **Ciência, Tecnologia e Ambiente**, v.5, p.1-7, 2017.

SOUZA, F.N.S.; OLIVEIRA, C.G.; MARTINS, E.S.; ALVES, J.M. Efeitos condicionador e nutricional de um remineralizador de solos obtido de resíduos de mineração. **Revista Agri-Environmental Sciences**, v.3, p.1-12, 2017.

SOUZA, F.N.S.; SANTANA, A.P.; ALVES, J.M.; MATEUS E SILVA, M.H. Efeitos de um remineralizador de solos (biotita-xisto) na produção de duas variedades de mandioca. **Revista Raízes e Amidos Tropicais**, v.12, p.45-59, 2016.

STRAATEN, P.V. Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.78, p.731-747, 2006.

TARDIEU, F.; SIMONNEAU, T. Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modelling isohydric and anisohydric behaviours. **Journal of Experimental Botany**, v.49, p.419-432, 1998.

TUCKER, C.J.; SELLERS, P.J. Satellite remote sensing of primary production. **International Journal Remote Sensing**, v.7, p.1395-1416, 1986.

THRANE, J.E.; KYLE, M.; STRIEBEL, M.; HAANDE, S.; GRUNG, M.; ROHRLACK, T.; ANDERSEN, T. Spectrophotometric Analysis of Pigments: A Critical Assessment of a High-Throughput Method for Analysis of Algal Pigment Mixtures by Spectral Deconvolution. **PLOS ONE**, v.10, p.1-24, 2015.

THEODORO, S.H. Experiências de uso de rochas silicáticas como fonte de nutrientes. **Espaço & Geografia, Brasília**, v. 9, n. 2, p. 263-292, 2006.

THEODORO, S.H.; LEONARDOS, O.H. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. **Anais Academia Brasileira de Ciências**, v.78, p.721-730, 2006.

TOSCANI, R.G.S.; CAMPOS, J.E.G. Use of basalt and phosphate rock powder as fertilizers in weathered soils. **Geociências**, v.36, p.259-274, 2017.

VALLADARES, F.; ARRIETA, S.; ARANDA, I.; LORENZO, D.; SÁNCHEZ-GÓMEZ, D.; TENA, D.; SUÁRES, F.; PARDO, J.A. Shade tolerance, photoinhibition sensitivity and phenotypic plasticity of *Ilex aquifolium* in continental Mediterranean sites. **Tree Physiology**, v.25, p.1041–1052, 2005.

VAHISALU, T.; KOLLIST, H.; WANG, Y.F.; NISHIMURA, N.; CHAN, W.Y.; VALERIO, G.; LAMMINMAKI, A.; BROSCHE, M.; MOLDAU, H.; DESIKAN, R.; SCHROEDER, J.I.; KANGASJARVI, J. SLAC1 is required for plant guard cell S-type anion channel function in stomatal signalling. **Nature**, v.452, 2008.

VON CAEMMERER S. Biochemical models of leaf photosynthesis. **Collingwood, Australia: CSIRO Publications**, 2000. 200p.

VINYARD, D.J.; ANANYEV, G.M.; DISMUKES, G.C. Photosystem II: The reaction center of oxygenic photosynthesis. **Annual Review of Biochemistry**, v.82, p.577–606, 2013.

XUE, S.; HU, H.; RIES, A.; MERILO, E.; KOLLIST, H.; SCHROEDER, J.I. Central functions of bicarbonate in S-type anion channel activation and OST1 protein kinase in CO₂ signal transduction in guard cell. **The EMBO Journal**, v.30, p.1645-1658, 2011.

XU, Y.; ZHANG, M.; TIAN, T.; SHANG, Y.; MENG, Z.; JIANG, J.; ZHAI, J.; WANG, Y. Mimicking how plants control CO₂ influx: CO₂ activation of ion current rectification in nanochannels. **Nature**, v.215, p.1-9, 2015.

YAO, X.; ZHOU, H.; ZHU, Q.; LI, C.; ZHANG, H.; WU, J.J.; XIE, F. Photosynthetic Response of Soybean Leaf to Wide Light-Fluctuation in Maize-Soybean Intercropping System. **Frontiers in Plant Science**, v.8, p.1-10, 2017.

YU, J.Y.; SHI, J.G.; MA, X.; DANG, P.F.; YAN, Y.L.; MAMEDOV, A.I.; SHAINBERG, I.; LEVY, G.J. Superabsorbent Polymer Properties and Concentration Effects on Water Retention under Drying Conditions. **Soil & Water Management & Conservation**, v.81, p.889-901, 2017.

WARREN, C. Estimating the internal conductance to CO₂ movement. **Functional Plant Biology**, v.33, p.431–442, 2006.

WARREN C.R.; DREYER E. Temperature response of photosynthesis and internal conductance to CO₂: results from two independent approaches. **Journal of Experimental Botany**, v.57, p.3057–3067, 2006.

WAREING, P.F. A New Photoperiodic Phenomenon in Short-Day Plants. **Nature**, v.171, p.614–615, 1953.

WEIGEL, M.; VAROTTO, C.; PESARESI, P.; FINAZZI, G.; RAPPAPORT, F.; SALAMINI, F.; DARIO LEISTER, D. Plastocyanin Is Indispensable for Photosynthetic Electron Flow in *Arabidopsis thaliana*. **The Journal of Biological Chemistry**, v.278, p.31286–31289, 2003.

WINIWATER, V.; BLUM, W.E.H. From marl to rock powder: On the history of soil fertility management by rock materials. **Journal of Plant Nutrition Soil Science**, v.171, p.316–324, 2008.

ZHAO, W.; ZHAO, X.; ZHOU, T.; WU, D.; TANG, B.; WEI, H. Climatic factors driving vegetation declines in the 2005 and 2010 Amazon droughts. **Plos One**, v.xx, p.1-19, 2017.

ZHOU, J.; PAVEK, M.J.; SHELTON, S.C.; HOLDEN, Z.J.; SANKARAN, S. Aerial multispectral imaging for crop hail damage assessment in potato. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.127, p.406–412, 2016.

ZOUNDI, Z. CO₂ emissions, renewable energy and the Environmental Kuznets Curve, a panel cointegration approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.72, p.1067-1075, 2017.

ZHANG, J.; LIU, J.; YANG, C.; DUD, 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.

ZHANG, S. R.; WANG, H.; WANG, Z.; REN, Y.; NIU, L.; LIU, J.; LIU, B. Photoperiodism dynamics during the domestication and improvement of soybean. **Science China Life Science**, v.60, p.1416–1427, 2017.

ZHOU, Z.; JIANG, Y.; WANG, Z.; GOU, Z.; LYU, J.; LI, W.; YU, Y.; SHU, L.; ZHAO, Y.; MA, Y.; FANG, C.; SHEN, Y.; LIU, T.; LI, C.; LI, Q.; WU, M.; WANG, M.; WU, Y.; DONG, Y.; WAN, W.; WANG, X.; DING, Z.; GAO, Y.; XIANG, H.; ZHU, B.; SUK-HA LEE, S.H.; WANG, W.; ZHIXI TIAN, Z. Resequencing 302 wild and cultivated accessions identifies genes related to domestication and improvement in soybean. **Nature Biotechnology**, v.33, p.408-414, 2015.

ZHENG, G.; CHEN, J.; LI, W. Impacts of CO₂ elevation on the physiology and seed quality of soybean. **Plant Diversity**, v.42, p.44-51, 2020.

**CAPÍTULO 1. VALIDAÇÃO EM CONDIÇÕES CAMPO DE SENSORES
ESPECTRAIS E FLUORESCÊNCIA ATIVA PARA FENOTIPAGEM DE
CULTIVARES DE SOJA SOB REGIMES HÍDRICOS VARIÁVEIS NO CERRADO**

VALIDAÇÃO EM CONDIÇÕES CAMPO DE SENSORES ESPECTRAIS E FLUORESCÊNCIA ATIVA PARA FENOTIPAGEM DE CULTIVARES DE SOJA NO CERRADO SUBMETIDOS A DIFERENTES REGIMES HÍDRICOS

RESUMO - Em programas de melhoramento, há a necessidade de ferramentas que identifiquem de forma inequívoca, rápida e não destrutiva, materiais tolerantes à seca. O objetivo deste trabalho foi validar, em condições de campo, sensores espectrais e de fluorescência ativa que utilizam a fluorescência transiente induzida por luz (LIFT) para a fenotipagem de cultivares de soja. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com seis repetições, em parcelas subdivididas. As parcelas foram as cultivares de soja (BRS 7280RR, NA 5909RG e BRS 5980IPRO) e as subparcelas, os regimes hídricos (RH) (RH1 - 167 mm, RH2 - 237 mm, RH3 - 341 mm, RH4 - 534 mm). Foram avaliadas as trocas gasosas e fluorescência com um analisador de gases a infra-vermelho, componentes produtivos, índices de vegetação e a fluorescência pela metodologia LIFT. As cultivares BRS 7280RR e NA 5909RG obtiveram médias de produtividade superiores à BRS 5980IPRO em todos os níveis de irrigação, já no RH1, somente a BRS 7280RR foi superior às demais. Como a taxa líquida de assimilação de CO₂ (A) foi semelhante em todos os RH para as três cultivares, a forma como cada uma delas destinou seus fotoassimilados foi decisiva para a determinação de sua performance em campo. Os maiores valores de índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e peso de mil grãos (PMG) para a cultivar NA 5909RG explicam as maiores produtividades em relação a cultivar BRS 5980IPRO. As variáveis resposta que diferenciaram os quatro RH avaliados foram: A , número de entre-nós (NEN), Produtividade, rendimento operacional (F_q'/F_m'), taxa de transporte de elétrons LIFT (ETR_L) e NDVI. As correlações muito fortes em relação à Produtividade foram encontradas apenas para NDVI e índice fotoquímico de reflectância (PRI) ($0,90 \leq \rho^{\wedge} < 1,00$). Em relação às variáveis resposta obtidas pelo IRGA e componentes produtivos, as correlações com a Produtividade foram de moderadas a fortes (0,60

$\leq \rho^{\wedge} < 0,90$). As variáveis resposta NDVI, PRI, ETR_L, F_q'/F_m', A e condutância estomática (g_s) puderam explicar a maior percentagem de variância dos dados, demonstrando assim, a importância da incorporação desta tecnologia na fenotipagem.

Termos para indexação: Trocas gasosas, fenotipagem, fluorescência transiente induzida por luz, seca e soja (*Glycine max*).

VALIDATION IN FIELD CONDITIONS OF SPECTRA SENSORS AND ACTIVE FLUORESCENCE FOR SOY PHENOTYPING IN THE CERRADO SUBMITTED TO DIFFERENTIAL WATER REGIMES

ABSTRACT - In breeding programs, there is a need for tools that uniquely, quickly and non-destructively identify drought-tolerant materials. The objective of this work was to validate, under field conditions, spectral and active fluorescence sensors that use light-induced transient fluorescence (LIFT) for phenotyping of soybean cultivars. The experimental design was in randomized blocks, with six replications, in subdivided plots. The plots were soybean cultivars (BRS 7280RR, NA 5909RG and BRS 5980IPRO) and the subplots, water regimes (WR) (WR1 - 167 mm, WR2 - 237 mm, WR3 - 341 mm, WR4 - 534 mm). Gas exchange and fluorescence were evaluated with an infrared gas analyzer, productive components, vegetation indexes and fluorescence using the LIFT methodology. The cultivars BRS 7280RR and NA 5909RG obtained higher productivity averages than BRS 5980IPRO in all irrigation levels, whereas in WR1, only BRS 7280RR was superior to the others. As the net CO₂ assimilation rate (*A*) was similar in all WR for the three cultivars, the way in which each one assigned its photoassimilates was decisive for determining its performance in the field. The higher values of vegetation index by normalized difference (NDVI) and weight of a thousand grains (WTG) for cultivar NA 5909RG explain the higher yields in relation to cultivar BRS 5980IPRO. The response variables that differentiated the four WR evaluated were: *A*, number of nodes (NN), Productivity, operational yield (F_q'/F_m'), electron transport rate LIFT (ETR_L) and NDVI. Very strong correlations in relation to Productivity were found only for NDVI and photochemical reflectance index (PRI) ($0.90 \leq \rho^{\wedge} < 1.00$). Regarding the response variables obtained by the IRGA and production components, the correlations with Productivity were moderate to strong ($0.60 \leq \rho^{\wedge} < 0.90$). The response variables NDVI, PRI, ETR_L , F_q'/F_m' , *A* and stomatal

conductance (g_s) could explain the higher percentage of data variance, thus demonstrating the importance of incorporating this technology in phenotyping.

Index terms: Gas exchange, phenotyping, transient fluorescence induced by light, drought and soy (*Glycine max*).

1.1. INTRODUÇÃO

Em plantas sob déficit hídrico, normalmente, ocorre diminuição da fotossíntese devido ao fechamento estomático que reduz a entrada de CO₂ para a célula e a energia absorvida não pode ser dissipada pelo ciclo de Calvin-Benson (DASZKOWSKA-GOLEC et al., 2019). Com isso, o excedente poder redutor formado durante a etapa fotoquímica da fotossíntese e o estado de superredução da cadeia de transporte de elétrons nas membranas dos tilacóides podem causar danos oxidativos às membranas celulares (CARVALHO, 2008; KAR, 2011; CHOUDHURY et al., 2017). Ainda, o mau funcionamento da cadeia de transporte de elétrons promove a maior dissipação da energia lumínica na forma de calor, como resultado da ineficiência do aparato fotossintético. Dentre as culturas de importância agrônômica, aquelas que realizam uma fina regulação estomática são capazes de, mesmo em condições adversas, manter sua produtividade, pois mantêm um balanço adequado entre perda de água e incorporação de CO₂ (ENGINEER et al., 2016; DASZKOWSKA-GOLEC et al., 2019).

Assim, métodos práticos e eficientes que proporcionem a identificação de plantas resistentes através da análise de seu desempenho fisiológico sob déficit hídrico, tornam-se ferramentas de grande valia para o melhoramento de plantas (MIRANSARI et al., 2013).

Dentre os diversos parâmetros fisiológicos existentes, destacam-se aqueles inerentes à fluorescência da clorofila *a* (MURCHIE; LAWSON, 2013) que avaliam o desempenho fotossintético e fornecem informações sobre a integridade dos complexos proteicos responsáveis pela coleta da luz (KALAJI et al., 2016). Tal técnica permite ainda, uma maior agilidade nas análises se comparada a outros métodos que envolvem a mensuração das trocas gasosas em plantas e as morosas medições biométricas, produzindo resultados rápidos, robustos e confiáveis, agilizando a seleção de genótipos no melhoramento de plantas (CENDRERO et al., 2017).

A energia contida na luz que é absorvida pelas plantas pode ser dissipada através de três maneiras: etapa fotoquímica, calor e re-emissão de fótons através da fluorescência (MAXWELL; JOHNSON, 2000; BAKER, 2008). Estes três processos competem entre si, de forma que o aumento em um implica necessariamente na redução dos outros (MAXWELL; JOHNSON, 2000; MURCHIE; LAWSON, 2013). A avaliação da fluorescência permite inferir sobre o desempenho fotossintético das plantas, pois há uma relação diretamente proporcional entre a eficiência fotossintética e a emissão de fluorescência (BAKER et al., 2008). Segundo El-Hendawy et al. (2017) todos os fatores estressantes, tais como, irradiância, salinidade, inundação e, principalmente a seca, interferem no metabolismo fotossintético e assim, alteram os padrões de emissão de fluorescência.

O uso de equipamentos para a avaliação de trocas gasosas através de infravermelho (“Infra Red Gas Analyser” – IRGA) com câmaras de fluorescência acoplada possui a limitação da quantidade de plantas, tem a análise limitada a algumas plantas ou ainda, uma ou duas folhas por planta, no entanto, demonstram de maneira muito precisa e objetiva, como a cultura utiliza a energia obtida em seu metabolismo primário e assim, detecta quais as influências de tais variáveis externas no metabolismo fotossintético (BAKER, 2008).

Tal abordagem possui limitações quando se pretende realizar mapeamentos de acessos ou mesmo, quando o número de genótipos promissores é demasiadamente grande, de forma que seu uso se torna oneroso e dispendioso. Desta forma, Cendrero et al. (2017) afirmam que embora os IRGA’s possuam a capacidade de produzir dados com grande acurácia, seu emprego em grandes áreas deve ser utilizado criteriosamente, pois pode não atender às demandas do melhoramento genético de plantas.

Novas técnicas que utilizam a fluorescência da clorofila *a*, tais como fluorômetros baseados na fluorescência transiente induzida por luz (“Light Induced Fluorescence Transient” - LIFT) (KOLBER et al., 1998) e sensores espectrais abarcados em plataformas

móveis, ambos de altíssimo rendimento na coleta de dados comumente denominadas de “*highthroughput*”, oferecem aos agrônomos, biólogos e todos os cientistas que trabalham com o melhoramento de plantas, uma nova ferramenta, com a possibilidade de análises de linhagens de plantas em diversas situações estressantes, o que pode facilitar a seleção de novos genótipos (PIERUSCHKA et al., 2010; CABRERA-BOSQUET, 2012; CENDRERO et al., 2017). Tais técnicas trabalham com a saturação da cadeia de transporte de elétrons através de algumas centenas de micro flashes (KOLBER, 2005) ou ainda, capturam de forma passiva, o espectro de emissão em plantas iluminadas por uma fonte de luz monocromática, neste caso, o sol (PEÑUELAS et al., 1995). Desta forma, como o emprego do LIFT no Brasil é raro, ou muito pouco relatado, são necessários estudos pioneiros que norteiem os trabalhos vindouros, balizando-se em técnicas já ratificadas a nível de campo. Ainda, dada importância da soja no agronegócio brasileiro, a adoção de ferramentas fisiológicas para fenotipagem a nível de campo para o aumento da produtividade é uma saída economicamente viável, ambientalmente sustentável.

O objetivo deste trabalho foi validar, em condições de campo, sensores espectrais e de fluorescência ativa que utilizam a metodologia LIFT para a fenotipagem de cultivares de soja submetidas a diferentes regimes hídricos.

1.2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em condições de campo na Embrapa Cerrados, unidade da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, em Planaltina - DF (15°35'30"S, 47°42'30"W), Brasil, entre junho a novembro de 2016, período com precipitação extremamente baixa, ideal para a avaliação de experimentos com estresse hídrico (Figura 1). A região tem uma precipitação média anual de 1500 mm ± 500 mm e seu clima dominante é tropical, quente e úmido, Aw, de acordo com a classificação de Köppen (ALVARES, et al., 2013). O solo é

classificado como Latossolo vermelho (SANTOS et al., 2018). A área tem sido cultivada com soja há dez anos e a análise do solo na profundidade de 0-20 e 20-40 cm antes da instalação do experimento está apresentada na Tabela 1. A umidade do solo foi mensurada nas camadas de 0-20 e 20-40 cm (Figura 2).

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com seis repetições, em esquema de parcelas subdivididas. As parcelas foram compostas por três cultivares de soja (BRS 5980IPRO, NA 5909RG e BRS 7280RR) e as subparcelas foram quatro regimes hídricos (RH). O espaçamento entre linhas foi de 50 cm, com densidade de 25 plantas por metro linear. Cada parcela consistiu de duas linhas centrais, eliminando-se 1,5 m de bordadura. O plantio e a emergência das plantas ocorreram nos dias 7 e 14 de junho, respectivamente, e a colheita foi feita no dia 4 de novembro, com duração total do ciclo para as três cultivares de 111 dias (Figura 1). A adubação de plantio foi de 300 kg ha⁻¹ dos formulados 02-20-15, aplicados como fertilização de manutenção. As sementes de soja foram inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* (1x10⁹ CFU g⁻¹ inoculante) a 200 g por 50 Kg de sementes.

A irrigação de todos as cultivares foi homogênea, durante 30 dias após a emergência (DAE). Após este período, foi implantada a metodologia line source (HANKS et al., 1976), modificado pela introdução de uma barra irrigadora conforme descrito por Jayme-Oliveira et al. (2017), utilizando-se aspersores com vazões decrescentes do centro para a extremidade da barra, gerando déficit hídrico em gradiente (Figura 3). Aos 75 DAE, quando a cultura se encontrava na fase R5.5, o experimento foi avaliado (Figura 1).

Os RHs abaixo foram obtidos utilizando-se uma barra de irrigação por aspersão de 20 m de largura (IrrigaBrasil modelo 36/42), conectada a um autopropelido TurboMaq 75/GB, com velocidade ajustável de acordo com a lâmina de água a ser aplicada e com aspersores cujas vazões decresceram do centro para a extremidade da barra. A lâmina final dos aspersores mais externos para os mais internos foi de 157,67 mm (16 m); 263,26 mm (13 m); 432,81 mm (10

m) e 630,22 mm (4 m), doravante denominadas RH1, RH2, RH3 e RH4, respectivamente (Figura 2), e os valores entre parêntesis representam as distâncias do RH avaliado da extremidade para o início da barra. O nível máximo de irrigação aplicado foi calculado de acordo com o programa de monitoramento de irrigação do Cerrado (EMBRAPA, 2016), que considera os dados climáticos da região, a evapotranspiração da cultura e o turno de rega para calcular a quantidade de água necessária, utilizando uma eficiência de 90%.

Foram avaliadas a taxa líquida de assimilação de CO₂ (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), condutância estomática (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e a taxa de transpiração (E) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) entre 9:00 e 13:00 h (horário solar), sob irradiância controlada de $1200 \mu\text{mol de f\u00f3tons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e concentração interna de CO₂ (C_a) de $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$. Para tanto, foi utilizado um sistema portátil de trocas gasosas de fluxo aberto (LI-6400XT; LI-COR Inc., LINCOLN, NE). Em cada parcela, foram feitas tr\u00eas medi\u00e7\u00f5es pontuais de trocas gasosas e fluoresc\u00eancia da clorofila *a*. As avalia\u00e7\u00f5es foram realizadas na folha central do trif\u00f3lio de folhas de soja mais jovens e completamente expandidas e fisiologicamente maduras. A efici\u00eancia qu\u00e2ntica m\u00e1xima da etapa fotoqu\u00edmica do fotossistema II (FSII) (F_v/F_m) (MAXWELL; JOHNSON, 2000) foi calculada como $F_v/F_m = (F_m - F_0) / F_m$. O rendimento qu\u00e2ntico efetivo do FSII (F_v'/F_m') (GENTY et al., 1989) foi calculado como: $F_v'/F_m' = (F_m' - F_0') / F_m'$. A taxa de transporte de el\u00e9trons, medida pelo IRGA (“electron transport rate” - ETR_I) (MAXWELL; JOHNSON, 2000): $ETR_I = \phi_{FSII} \times DFF \times (0,84) \times (0,5)$, em que DFF \u00e9 a densidade de fluxo de f\u00f3tons, ou quantidade de luz absorvida ($\mu\text{m de f\u00f3tons m}^{-2}\text{s}^{-1}$) (MAXWELL; JOHNSON, 2000).

A fluoresc\u00eancia m\u00e1xima (F_m) e fluoresc\u00eancia basal (F_0), foram avaliadas com a folha adaptada ao escuro, e as mesmas avalia\u00e7\u00f5es foram feitas com a folha adaptada \u00e0 luz, a saber, F_m' e F_0' . A efici\u00eancia intr\u00ednseca no uso da \u00e1gua (“intrinsic water use efficiency” – $iWUE$) e a efici\u00eancia instant\u00e2nea do uso da \u00e1gua (“water use efficiency” – WUE) foram calculadas como $iWUE = A / g_s$ ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$); e $WUE = A / E$ ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$),

respectivamente (MEDRANO et al., 2015). O conteúdo de prolina ($\mu\text{mol g}^{-1}$ PF) foi determinado em folhas de soja coletadas às 14:00 horas, congeladas em nitrogênio líquido e armazenadas câmara fria a 80 °C, segundo Bates et al. (1973).

A eficiência operacional do FSII (F_q'/F_m') e a ETR_L foram mensuradas pela metodologia LIFT (KOLBER et al., 1998; KOLBER, 2005; KELLER, et al., 2018) utilizando-se o método LIFT-REM e o protocolo Q_A (SOLIENSE INC., SHOREHAM, NY, EUA), como descrito por Kolber (2005) e Keller et al. (2018). Os índices de vegetação (IV) foram obtidos através de um espectrômetro incluído no mesmo equipamento utilizado para medir a fluorescência pela metodologia LIFT. Um espectrômetro STS-VIS (OCEAN OPTICS) instalado no instrumento LIFT com faixa espectral de 400-800 nm, foi utilizado para determinar os IV: índice fotoquímico de refletância (“photochemical reflectance index” - PRI) e índice de vegetação por diferença normalizada (“normalized difference vegetation index” - NDVI). Esses índices espectrais foram calculados da seguinte forma: $NDVI = (R_{800} - R_{640}) / (R_{800} + R_{640})$ e $PRI = (R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$ e os dados obtidos com relação sinal / ruído ruins foram eliminados (BABAR, 2006; PIERUSCHKA, et al., 2015).

Os componentes produtivos foram determinados por contagem, medição com o auxílio de paquímetro digital, régua graduada e ainda, por pesagem. Os componentes produtivos avaliados foram: Número de Entre-Nós (NEN), Altura (H) (cm), Diâmetro do caule (D) (mm), Peso de Mil Grãos (PMG) ($\text{g } 1000\text{grãos}^{-1}$), Densidade de grãos (DG) (Kg m^{-3}), Número de Vagens (NV) e Produtividade (Kg/ha). A Produtividade foi estimada a partir da colheita de duas linhas de dois metros lineares de cada parcela e a umidade dos grãos foi corrigida para 13%.

Os dados obtidos foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk e após serem considerados normais, foi feita a análise de variância (ANOVA), em seguida as médias foram comparadas utilizando-se o teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Realizou-se a análise de correlação de Pearson entre todas as variáveis, com o auxílio do software estatístico R versão

3.33. Realizou-se ainda a análise dos componentes principais (ACP) entre as médias de todas as variáveis obtidas através da análise das trocas gasosas, LIFT e dados biométricos, utilizando-se o software estatístico R versão 3.33.

1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise das Cultivares

As avaliações das trocas gasosas foliares (A , g_s e E) foi semelhante entre os cultivares de soja e, portanto, não foi possível identificar quais as cultivares com melhor potencial metabólico, uma vez que não foram observadas diferenças estatísticas entre elas nos RH estudados (Tabela 2). Os dados de fluorescência da clorofila a tais como: F_v/F_m , F_v'/F_m' , Φ_{FSII} , ETR_I e qP medidos pelo IRGA, pouco contribuíram para a identificação de diferenças entre as cultivares (Tabela 3). Foram obtidas diferenças significativas somente para qN e NPQ , em que, em geral a NA 5909RG apresentou maior qN e NPQ que a cultivar BRS 5980IPRO para a maioria dos RHs (Tabela 3).

Para os componentes produtivos foi possível identificar quatro variáveis resposta que contribuíram para explicar as diferenças entre as cultivares, dentre elas o PMG, NV, H e Produtividade (Tabela 4). As demais variáveis resposta não diferiram entre as cultivares dentro de cada RH (Tabela 4). Os menores valores para o PMG foram obtidos na cultivar BRS 5980IPRO independentemente do RH (Tabela 4). Analisando-se o PMG dentro do RH4, as cultivares NA 5909RG e BRS 7280RR foram estatisticamente semelhantes, com médias de 143,36 e 141,99 g, respectivamente. Para o RH3 a cultivar BRS 5909RG apresentou a maior média, 125,46 g. Já dentro do RH2, a cultivar BRS 7280RR apresentou médias estatisticamente superiores às demais de 120,10 g. No RH1, ambas as cultivares, NA 5909RG e BRS 7280RR, foram estatisticamente semelhantes, com valores médios de 98,14 e 103,13 g, respectivamente. O NV diferiu entre as cultivares somente no RH3 e RH4, em que para o RH3, o NV foi maior

na cultivar BRS5980IPRO (24,43) que na NA5909RG (16,73) e no RH4, o NV foi menor na BRS7280RR (18).

A cultivar BRS 7280RR apresentou os maiores valores de H em todos os RH avaliados. A produtividade foi estatisticamente superior para NA 5909RG nos RH4, RH3 e RH2 que a BRS5980IPRO e no RH1, a BRS 7280RR apresentou maior produtividade (541,05 Kg ha⁻¹) que as demais (Tabela 4).

Os dados obtidos a partir do sensor de fluorescência pela metodologia LIFT (KOLBER, 2004) (F_q'/F_m' e ETR_L) e os IV (NDVI e PRI) (BABAR, 2008), obtidos pelo sensor espectral abarcado na plataforma de mensuração de fluorescência, permitiram a diferenciação das cultivares. As cultivares NA 5909RG e BRS 7280RR apresentaram os maiores valores para F_q'/F_m' em todos os RH (Tabela 5), com exceção do RH4 em que somente a BRS7282RR (0,517) apresentou maiores valores que a BRS 5980IPRO (0,491). A cultivar BRS 7280RR apresentou os maiores valores para a ETR_L nos RH4 (6336,875), RH3 (5462,264) e RH2 (4200,445) e somente no RH1 as cultivares BRS 5980IPRO (3486,747) e BRS 7280RR (3447,112) foram maiores que a NA 5909RG (2495,157) (Tabela 5). O NDVI foi estatisticamente superior para a cultivar NA 5909RG em todos os RH (Tabela 5), com valores entre 0,544 e 0,225 no RH4 e RH1, respectivamente. Já o PRI foi estatisticamente superior para cultivar BRS 7280RR em todos os RH avaliados (Tabela 5). Dadas suas características e o fato de que, as três cultivares são recomendadas para a região do Centro-Oeste e Nordeste do país, abrangendo os estados de Goiás, Bahia, Maranhão e Piauí, esperava-se que as diferenças entre elas seriam estreitas (EMBRAPA, 2013). A cultivar BRS 7280RR destacou-se nas maiores lâminas de irrigação (RH4) e ainda, sob déficit hídrico moderado a severo (RH3 e RH2).

A questão, no entanto, é, como explicar estas maiores produtividades na cultivar NA 5909RG, em relação à cultivar BRS 5980IPRO para a maioria dos RHs se, estatisticamente não foram observadas diferenças para a assimilação líquida de CO₂ em nenhuma das delas?

Segundo He (2017), caso a cultura destine seus fotoassimilados para o crescimento radicular em detrimento da parte aérea, possivelmente, a produtividade potencial da cultura pode ser prejudicada, pois a porção de biomassa fotossintetizante será reduzida e com isso, os fotoassimilados necessários para o enchimento de grãos. Assim, se as taxas fotossintéticas foram as mesmas, possivelmente a remobilização dos fotoassimilados para os grãos foi diferente (ERB; ZARZYCKI, 2017).

O PMG é uma variável relacionada com a produtividade, desta forma, grãos mais pesados indicam que a cultura se encontra plenamente balanceada em suas relações fonte dreno. A cultivar NA 5909RG, no geral, apresentou os maiores valores de PMG e também, a maior produtividade (Tabela 4). Estes maiores valores neste componente produtivo podem ser explicados pelos maiores valores de NDVI, que indica uma maior produção de biomassa na cultivar em questão (GOODWIN et al., 2018). A H, uma característica usada como um marcador morfológico e nem sempre está associada à produtividade (ZHAI et al., 2016), neste caso em especial, as diferenças em H observadas na cultivar BRS 7280RR não se traduziram em maiores produtividades. Desta forma, foi possível identificar uma cultivar com o potencial produtivo superior, a NA 5909RG, que apresentou maiores valores de PMG, F_q'/F_m' , NDVI e Produtividade (Tabela 4; Tabela 5).

Estes dados indicam que, possivelmente, a cultivar NA 5909RG foi a que translocou a maior parte de seus fotoassimilados na construção de sua parte aérea, através dos maiores valores de NDVI (Tabela 5), somado a isso, F_q'/F_m' e $ETRL$ indicam a maior eficiência na converção de CO_2 em fotoassimilados e posteriormente, em sua produtividade. Apesar da produtividade da cultivar BRS 7280RR ser semelhante a NA 5909RG na maioria dos RHs, os maiores valores de PRI e menores valores de NDVI (Tabela 5), indicam que essa cultivar destinou seus fotoassimilados à sua capacidade fotoprotetora, resultando em Produtividade semelhante à cultivar NA 5909RG (KOVÁČ et al., 2018), assim, o PRI pode desempenhar uma

função compensatória sob condições de seca. Tais dados podem ainda ser corroborados pelos maiores valores de qP e NPQ , obtidos pelo IRGA, que estão relacionados à capacidade de dissipação do excesso de energia de excitação através do calor, denotando que a cultivar BRS 7280RR pode possuir maiores estratégias sob estresse hídrico, , garantindo produtividade semelhante a cultivar NA 5909RG, mesmo produzindo menor quantidade de biomassa.

Influência dos RH em parâmetros fisiológicos

A partir de A , g_s e E , foi possível identificar resposta decrescente entre o RH4 e o RH1 (Tabela 2). Somente o C_i apresentou resposta inversa (Tabela 2). Nos dados obtidos pelo fluorômetro instalado no IRGA somente qN e NPQ não apresentaram diferenças entre os RHs; para as demais variáveis resposta, foi observada diferença estatística entre os RH aplicados e de forma geral, os valores estatisticamente superiores foram observados no RH4 em relação ao RH1 (Tabela 3). Nos componentes produtivos houve diferença estatística que seguiram a tendência dos dados supracitados (Tabela 4). Todas as variáveis obtidas pelos sensores de fluorescência e hiperespectral foram capazes de diferenciar estatisticamente cada um dos RHs, e de forma geral, o RH4 foi superior aos demais (Tabela 5). Dentre as variáveis relacionadas à eficiência no uso da água, somente o teor de Prolina não apresentou diferença estatística entre os RHs, as demais, apresentaram reduções significativas com a redução do RH (Tabela 6).

As trocas gasosas foram drasticamente afetadas pela redução do RH, comumente tais reduções acontecem devido ao paradoxo de assimilação do CO_2 (REICHGELT; ANDREA, 2019), em que a necessidade de regulação das perdas de água resulta em reduções na fotossíntese líquida (LIU et al., 2005). Normalmente, essa situação ocorre nos RHs mais estressados, isto é, a partir do RH3, em que há diminuição do metabolismo fotossintético, afetando, inclusive a manutenção do seu funcionamento (GUO et al., 2018). Como resultado do fechamento estomático, o C_i aumenta nos RHs sob déficit hídrico, pois o CO_2 intrafoliar não

é consumido e a respiração celular é mantida (TAUB, 2010). Por outro lado, nos RHs mais irrigados o oposto também acontece, o consumo de CO₂ e os maiores valores de *A* corroboram com os menores valores de *C_i* (Tabela 1). O aumento em *C_i* também podem estar associado a alguma limitação bioquímica relacionada à seca, pois a redução na assimilação líquida de CO₂ implica diretamente no aumento de sua concentração interna ((REICHGELT; ANDREA, 2019).

O aumento do tempo de exposição ao déficit hídrico nos RHs sob seca severa, causa danos celulares em importantes complexos proteicos responsáveis pelos eventos fotossintéticos, dentre eles, a proteína D1 do FSII (KEREN et al., 1997). Esta proteína está relacionada aos processos de fotólise da água e desta forma, o fechamento estomático, ao limitar a entrada de CO₂ ambiente para dentro dos sítios de carboxilação da Rubisco, induz um estado de superexcitação nas membranas dos tilacóides, pois o excedente de poder redutor produzido passa a ser danoso a estas membranas (PARRY et al., 2002). Com isso, a planta poderá sofrer com sintomas de fotoinibição dinâmica, caso a proteína D1 seja reparada, ou ainda, como observado neste trabalho, a fotoinibição pode ser crônica, caso a seja necessário a síntese “de novo” dessa proteína (GENTY et al., 1989; MAXWELL; JOHNSON, 2000; ROHÁČEK et al., 2008; PIERUSCHKA et al., 2014). A determinação da fluorescência da clorofila *a* reflete muito bem tais danos, e de forma significativa, tanto os dados obtidos pelo IRGA e através da metodologia LIFT apresentaram resultados semelhantes (Tabela 3; Tabela 5). Ambas as metodologias indicam que quanto mais severo é o estresse hídrico, mais acentuados serão os prejuízos metabólicos, culminando em maiores reduções no potencial fotossintético.

Apesar de ser semelhante entre os quatro RHs a H foi importante para a identificação das cultivares, tal como demonstrado anteriormente (Tabela 4). Os reflexos da redução dos RHs na H foram expressivos, se comparados ao RH4, no RH3, pequenas reduções da quantidade de água fornecida, reduziu H em 1,02, 6,75 e 2,69% para as cultivares BRS 5980IPRO, BRS

7280RR e NA 5909RG respectivamente. Esses dados indicam o efeito negativo da seca no crescimento da cultura, em que modestas reduções na altura foram observadas (GUO et al., 2018). À medida que a seca torna-se mais severa, as reduções em H aumentam; 25,5, 31,5 e 31,4% no RH2 e 53,6, 56,2 e 45% no RH1, para as cultivares BRS 5980IPRO, BRS 7280RR e NA 5909RG, respectivamente, conforme também observado por FELIPPE et al. (2016). A produção de biomassa a partir da fotossíntese é então prejudicada, e a cultura terá que sobreviver à seca sem deixar de produzir indivíduos fisiologicamente viáveis (JI et al., 2012). Nestas situações, nota-se que a soja sob déficit hídrico severo, como no RH1 e RH2, há reduções da alocação de fotoassimilados de caules e folhas, direcionando-os para as estruturas reprodutivas. Desta forma, as causas das reduções em H podem ser justificadas pelos danos ao metabolismo fotossintético (JAYME-OLIVEIRA et al., 2017), que altera negativamente a Produtividade (Tabela 4).

Entre as metodologias utilizadas em cada RH, pode-se revelar a eficiência e sensibilidade das três metodologias de análise, a saber: IRGA, LIFT e componentes produtivos. Pela metodologia LIFT e através do espectrômetro abarcado no equipamento LIFT, somente o PRI não foi capaz de diferenciar os quatro RH individualmente (Tabela 5). Os dados de fluorescência provenientes do IRGA não foram capazes de distinguir os quatro RH individualmente, somente A foi capaz de fazê-lo (Tabela 2). Somente na cultivar NA 5909RG observou-se a distinção dos quatro RH para o PMG (Tabela 4). O NEN e Produtividade foram diferenciados em todos RH para todas as cultivares (Tabela 4).

De acordo com os dados obtidos no presente trabalho, bastaria então mensurar componentes de produção como o PMG e produtividade, como há décadas vem sendo feito (COELHO et al., 2018). Apesar disso, a avaliação do PMG não se aplica em programas de melhoramento em larga escala, pois, quanto mais tempo a cultura permanece no campo, maiores são os gastos com insumos (WESSELER, 2019). Assim, novas tecnologias são uma estratégia

econômica e objetiva, pois permitem a obtenção de informações de forma precoce, agilizando a tomada de decisão de forma responsável, baseando-se em ferramentas com grande potencial de predição da produtividade (CENDRERO et al., 2017).

Cabrera-Bosquet (2012) relata que os sensores de fluorescência e espectrômetros são uma grande promessa para a fenotipagem de plantas e define tal tecnologia como não invasiva, não destrutiva e de alto rendimento na análise. De fato, pode-se atribuir a elevada capacidade de coleta de dados por parcela e extrema rapidez de análise, à capacidade de distinção dos RHs. Enquanto a fluorescência modulada é mensurada somente em algumas folhas com o IRGA, a metodologia LIFT permite a análise de dezenas plantas em poucos segundos (KELLER et al., 2018). No entanto, deve-se observar a finalidade de cada equipamento, enquanto a assimilação líquida de CO₂, que é a mensuração de diversos pontos de consumo do CO₂ ao longo do tempo ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), distinguiram significativamente os quatro RH o fluorômetro acoplado à sua câmara de assimilação não o fez (Tabela 2; Tabela 3). Fica claro que, a especialidade de tal equipamento e sua aplicabilidade tornou o mesmo extremamente sensível na medição das trocas gasosas, mas por outro lado, a fluorescência tornou-se apenas um acessório, não sendo capaz de produzir dados com qualidade suficiente para, em condições de campo, distinguir cada RH (PIERUSCHKA et al., 2012). Através da metodologia LIFT, foi possível identificar cada RH através dos dados de fluorescência (F_q'/F_m' e ETR) e também foi possível através do uso do sensor espectral abarcado na plataforma LIFT (NDVI) (Tabela 5). De igual forma, esta plataforma de medição de fluorescência que utiliza a metodologia LIFT (KOLBER, 2005; KELLER et al., 2018) especializou-se em mensurar unicamente dados de fluorescência, e de forma interessante, tais dados possuem o mesmo sentido que os dados de trocas gasosas e com isso, pode-se prever a produtividade (Tabela 2; Tabela 4; Tabela 5).

A relação entre A , g_s e E e a fluorescência obtida pela metodologia LIFT pode ser encontrada em Kolber et al. (2005), Pieruschka et al. (2010) e Osmond et al. (2017), mas

experimentos de campo com culturas largamente utilizadas no Brasil e ainda, em regiões que ocorrem déficit hídrico (SENTELHAS et al., 2015), permitem obter resultados diferentes daqueles obtidos em condições de casa de vegetação, sob condições controladas. Assim, este trabalho norteia as possíveis variações da fluorescência obtida pela metodologia LIFT em resposta à seca e em condições reais de cultivo.

Análise de Correlação

Segundo Callegari-Jacques (2003), se $0,00 < \rho^{\wedge} < 0,30$, existe fraca correlação linear; se $0,30 \leq \rho^{\wedge} < 0,60$, existe moderada correlação linear; se $0,60 \leq \rho^{\wedge} < 0,90$, existe forte correlação linear; se $0,90 \leq \rho^{\wedge} < 1,00$, existe correlação linear muito forte. Neste trabalho, a correlação entre produtividade e F_q'/F_m' , PRI e NDVI foi de 0,86, 0,91 e 0,95, respectivamente (Figura 4), mostrando que os dados obtidos por sensores espectrais e de fluorescência são capazes de se correlacionar com a produtividade em agroecossistemas (GARBUSKY et al., 2011). As correlações forte e muito forte podem ser a evidência de que a maior produtividade é o reflexo do maior potencial da maquinaria fotossintética em resposta ao acúmulo de biomassa. A análise dos dados do fluorômetro e do sensor espectral abarcados no equipamento LIFT e os componentes de produtivos reforçam esta idéia (Tabela 5, Figura 4), dada a forte correlação linear de Pearson entre os componentes produtivos e os dados obtidos pelo LIFT (F_q'/F_m' , PRI e NDVI) de 0,64, 0,62 e 0,69 para o PMG, 0,66, 0,77 e 0,74 para NV, 0,74, 0,9 e 0,86 para NEN, 0,74, 0,82 e 0,81 para D e 0,65, 0,80 e 0,72 para H, respectivamente (Tabela 4; Figura 4). A relevância destas correlações, estão atreladas à predição do comportamento da cultura no campo, assim, espera-se que quaisquer aumentos ou reduções em componentes relacionados ao ganho de biomassa (PMG, NV, NEN, D, H e Produtividade) estejam correlacionados com as alterações observadas nos IV e dados de fluorescência obtidos pelo LIFT (KOLBER et al., 2005; PIERUSCHKA et al., 2010; PIERUSCHKA et al., 2014; CENDERO et al., 2017).

Raun et al. (2002) também obtiveram excelentes resultados quando estudaram a correlação entre a produtividade e a fertilização nitrogenada, mensurados através do NDVI, no entanto, nenhuma outra metodologia foi utilizada para validar ou comparar os dados obtidos. Kohzuma et al. (2018) também realizaram a validação do PRI utilizando-se mutantes de *Arabidopsis thaliana* defectivas para o ciclo das xantofilas, demonstrando a importância deste índice para mensuração da capacidade fotoprotetora das plantas. O presente trabalho possui o diferencial de ser uma aplicação prática realizada em condições de campo e ainda, contar com outras metodologias já utilizadas, tais como analisadores de trocas gasosas e componentes de produtividade, para validar a eficácia de sensores de fluorescência e espectrais.

Os dados obtidos pela metodologia LIFT (F_q'/F_m' e ETR_L) e pelo espectrômetro abarcado no equipamento LIFT (NDVI e PRI) estão fortemente correlacionados com dados de trocas gasosas obtidos pelo IRGA (Figura 4). Isto indica que as respostas obtidas por cada equipamento, mesmo que observadas separadamente, podem possuir a mesma interpretação (Tabela 4). No entanto, os fluorômetros de cada equipamento parecem produzir dados com diferenças contrastantes no que tange à correlação com a produtividade, o que pode revelar a eficácia de cada metodologia de medição da fluorescência da clorofila *a*, seja ela modulada (MAXWELL; JOHNSON, 2000) ou pela metodologia LIFT (KELLER et al., 2018). As correlações para o F_q'/F_m' com a Produtividade foram de fortes (0,86) utilizando-se a metodologia LIFT e para F_v'/F_m' utilizando-se o IRGA, moderada (0,56) (Figura 4). Muito embora os dados de fluorescência obtidos pelo IRGA sejam importantes, a nível de campo sua aplicabilidade como ferramenta para o melhoramento de plantas é questionável (CABRERA-BOSQUET, 2012). A correlação da fluorescência de ambos equipamentos (IRGA e LIFT) foi de 0,49, considerada moderada, somado a isso, existe forte correlação entre fluorescência obtida pela metodologia LIFT e as trocas gasosas, componentes de produção e produtividade, o que conduz à afirmativa de que seus dados podem possuir maior confiabilidade, e caso exista

alguma inconsistência, ela encontra-se na fluorescência medida pelo IRGA, pois do contrário, a correlação entre os equipamentos seria elevada (HILL; LI, 2016). Nesse sentido, a decisão de utilizar estes equipamentos, pode ser pautada pela necessidade de avaliação em larga escala, assim, o uso de equipamentos não invasivos, não destrutivos e de elevada eficiência na coleta de dados (highthroughput), como o LIFT, deve ser utilizado.

A análise dos componentes principais permitiu identificar quais variáveis são responsáveis por explicar a maior percentagem da variância dos dados e ainda, determinar quais delas estão mais próximas da variável Produtividade (Figura 5). Desta forma, pode-se inferir que os dados de fluorescência da clorofila *a* oriundos do LIFT e componentes produtivos estão estreitamente relacionados com a produtividade. O fato de tais parâmetros estarem intimamente associados à produtividade indica que tais metodologias são extremamente eficientes para a predição da produtividade da soja, e ainda, potenciais ferramentas em programas de melhoramento. Ademais, o NDVI, PRI, ETR_L e F_q'/F_m' contribuíram de forma efetiva para explicar a variância dos dados no eixo 1 em termos percentuais (Figura 5) e este eixo foi responsável por explicar 53,28% da variância dos dados. Ressalta-se ainda que, a metodologia LIFT emprega uma análise muito mais rápida, não destrutiva e de altíssimo rendimento, sendo capaz de ser utilizada na fenotipagem de um elevado número de plantas (CENDRERO et al., 2017). Por outro lado, parâmetros biométricos e até mesmo, as trocas gasosas foliares, especialmente *A* e *g_s*, também apresentaram expressivas contribuições (Figura 5), mas estão atrelados a um menor número de indivíduos analisados, ainda, são inviáveis e muitas vezes inexequíveis, quando existe um número grande de amostras (JACKSON et al., 1996).

1.4. CONCLUSÕES

A cultivar NA 5909RG apresentou maior produtividade que a BRS 5980IPRO e tal superioridade pôde ser atribuída aos maiores valores de NDVI e PMG. Os dados de

fluorescência e trocas gasosas do IRGA não foram capazes de identificar diferenças entre as cultivares. As variáveis resposta que diferenciaram os quatro RH avaliados foram: A, NEN, Produtividade, F_q'/F_m' , NDVI e ETR_L . As correlações muito fortes em relação à produtividade foram encontradas apenas para NDVI e PRI. Em relação às variáveis resposta obtidas pelo IRGA e os componentes produtivos, promoveram correlações de moderadas a fortes com a produtividade. Os dados obtidos pela metodologia LIFT e espectrômetro abarcado no equipamento LIFT puderam ser agrupados de forma mais estreita com os componentes produtivos e a produtividade, explicando melhor sua variância. As variáveis resposta NDVI, PRI, ETR_L , F_q'/F_m' , A e g_s puderam explicar a maior percentagem de variância dos dados.

1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DASZKOWSKA-GOLEC, A.; SKUBACZ, A.; KUROWSKA, M.; SŁOTA, M.; SWIERGOLIK, D.; SZAREJKO, I. Methods for the simple and reliable assessment of barley sensitivity to abiotic stresses during early development. **Methods in Molecular Biology**, v. 1900, p. 1-25, 2019.

GUTIERREZ, M.; NORTON, R.; THORP, K.R.; WANG, G. Association of Spectral Reflectance Indices with Plant Growth and Lint Yield in Upland Cotton. **Crop Science**, v.52, p.849-857, 2012.

BAKER, N.R. Chlorophyll Fluorescence: A Probe of Photosynthesis In Vivo. **Annual Review of Plant Biology**, v.59, p. 89-113, 2008.

BABAR, M.A.; REYNOLDS, M.P.; VAN GINKEL, M.; KLATT, A.R.; RAUN, W.R.; STONE, M.L. Spectral Reflectance to Estimate Genetic Variation for In-Season Biomass, Leaf Chlorophyll, and Canopy Temperature in Wheat. **Crop Science**, v.46, p.1046-1057, 2006.

CARVALHO, M.H.C. Drought stress and reactive oxygen species Production, scavenging and signaling. **Plant Signaling & Behavior**, v.3, p.156-165, 2008.

CAVATTE, P.C.; OLIVEIRA, Á.A.G.; MORAIS, L.E.; MARTINS, S.C.V.; SANGLARD, L.M.V.P.; DAMATTA, F.M. Could shading reduce the negative impacts of drought on coffee? A morphophysiological analysis. **Physiologia Plantarum** (Kobenhavn. 1948), v.144, p.111-122, 2012.

CHOUDHURY, F.K., RIVERO R.M., BLUMWALD, E. AND MITTLER, R. Reactive oxygen species, combination abiotic stress and stress. **The Plant Journal**, v90, 856–867, 2017.

CENDRERO, M.; PILAR, M.; MULLER, O.; ALBRECHT, H.; BURKART, A.; GATZKE, S.; JANSSEN, B.; KELLER, B.; KÖRBER, N.; KRASKA, T.; MATSUBARA, S.; LI, J.; MÜLLER-LINOW, M.; PIERUSCHKA, R.; PINTO, F.; RISCHBECK, P.; SCHICKLING, A.; STEIER, A.; WATT, M.; SCHURR, U.; RASCHER, U. Field Phenotyping: Concepts and Examples to Quantify Dynamic Plant Traits across Scales in the Field. In: CHABBI, A.; LOESCHER, H.W. (Ed.). **Terrestrial Ecosystem Research Infrastructures: Challenges and Opportunities**. CRC Pres, p.53-79, 2017.

COELHO, A.P.; DAVID LUCIANO ROSALEN, D.L.; FARIA, R.T. 2018. Vegetation indices in the prediction of biomass and grain yield of white oat under irrigation levels. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 48: 109-117.

DAMATTA, F.M.; LOOS, R.A.; SILVA, E.A.; LOUREIRO, M.E.; DUCATTI, C. Effects of soil water deficit and nitrogen nutrition on water relations and photosynthesis of pot-grown *Coffea canephora* Pierre. **Trees**, v.16, p.555–558, 2002.

DAMATTA, F. M. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. **Field Crops Research** v.86, p.99–114, 2004.

ENGINEER, C.B.; HASHIMOTO-SUGIMOTO, M.; NEGI, J.; ISRAELSSON-NORDSTRÖM, M.; AZOULAY-SHEMER, T.; RAPPEL, W.J.; IBA, K.; SCHROEDER, J. CO₂ Sensing and CO₂ Regulation of Stomatal Conductance: Advances and Open Questions. **Trends in Plant Science**, v.21, p.xx-xx, 2016.

FELIPPE, D.; NAVROSKI, M.C.; SAMPIETRO, J.A.; FRIGOTTO, T.; ALBUQUERQUE, J.A.; MOTA, C.S.; PEREIRA, M.O. Efeito do hidrogel no crescimento de mudas de *Eucalyptus benthamii* submetidas a diferentes frequências de irrigação. **Floresta**, v.46, p.215–225, 2016.

GENTY, B.; BRIANTAIS, J.M.; BAKER, N.R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)**, v.990, p.87–92, 1989.

GOODWIN, A.W.; LINDSEY, L.E.; HARRISON, S.K.; PAUL, P.A. Estimating Wheat Yield with Normalized Difference Vegetation Index and Fractional Green Canopy Cover. **Crop Management**, v.4, p.1-6, 2018.

GUTIERREZ, M.; NORTON, R.; THORP, K.R.; WANG, G. Association of spectral reflectance indices with plant growth and lint yield in upland cotton. **Crop Science**, v.52, p.849-857, 2012.

GUO, R.†; LIAN XUAN SHI, L.X.†; YANG JIAO, Y.; LI, M.X.†; ZHONG, X.L.; GU, F.X.; LIU, Q.; XIA, X.; LI, H. **AoB Plants**, v.10, p.1-13, 2018.

HANKS, R.J., KELLER, J., RASMUSSEN V.P. AND WILSON, G.D. Line Source Sprinkler for Continuous Variable Irrigation-crop Production Studies. **Soil Science Society of America**, v.40, 426-429, 1976.

JAMNICKÁ, G.; DITMAROVÁ, Ľ.; KURJAK, D.; KMEŤ, J.; PŠIDOVÁ, E.; MACKOVÁ, M.; GÖMÖRY, D.; STŘELCOVÁ, K. The soil hydrogel improved photosynthetic performance of beech seedlings treated under drought. **Plant Soil Environment**. v.59, p.446–451, 2013.

JACKSON, P.; ROBERTSON, M.; COOPER, M.; HAMMER, G. The role of physiological understanding in plant breeding; from a breeding perspective. **Field Crops Research**, v.49, p.1-37, 1996.

JI, K.; WANG, Y.; SUN, W. Drought-responsive mechanisms in rice genotypes with contrasting drought tolerance during reproductive stage. **Journal of Plant Physiology**, v.169, p.336–344, 2012.

KAR, R.K. Plant responses to water stress: Role of reactive oxygen species Plant. **Signaling & Behavior**, v.6:11, p.1741-1745, 2011.

KOLBER, Z.; KLIMOV, D.; ANANYEV, G.; RASCHER, U.; BERRY, J.; OSMOND, B. Measuring photosynthetic parameters at a distance: laser induced fluorescence transient (LIFT) method for remote measurements of photosynthesis in terrestrial vegetation. **Photosynthesis Research**, v.84, p.121–129, 2005.

KOHZUMA, K.; HIKOSAKA, K. Physiological validation of photochemical reflectance index (PRI) as a photosynthetic parameter using *Arabidopsis thaliana* mutants. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, v.498, p.52-57, 2018.

KOVÁČ, D.; VESELOVSKÁ, P.; KLEM, K.; VEČEŘOVÁ, K.; AČ, A.; PEÑUELAS, J.; URBAN, O. Potential of photochemical reflectance index for indicating photochemistry and light use efficiency in leaves of european beech and norway spruce trees. *Remote Sensing*, v.10, p.1-27, 2018.

MIRANSARI, M.; RIAHI, H.; EFTEKHAR F.; MINAIE, A.; SMITH, D.L. Improving Soybean (*Glycine max* L.) N₂ Fixation under Stress. **Journal Plant Growth Regulation**, v.32, p.909–921, 2013.

KELLER, B.; VASS, I.; MATSUBARA, S.; PAUL, K.; JEDMOWSKI, C.; PIERUSCHKA, R.; NEDBAL, L.; RASCHER, U.; MULLER, O. Maximum fluorescence and electron transport kinetics determined by light-induced fluorescence transients (LIFT) for photosynthesis phenotyping. **Photosynthesis Research**, v.140, p.221-233, 2018.

KALAJI, H.M.; JAJOO, A.; OUKARROUM, A.; BRESTIC, M.; ZIVCAK, M.; SAMBORSKA, I.A.; CETNER, M.D.; ŁUKASIK, I.; GOLTSEV, V.; LADLE, R.J.

Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.38, p.102-112, 2016.

KOLBER, Z.S.; PRÁŠIL, O.; FALKOWSKI, P.G. Measurements of variable chlorophyll fluorescence using fast repetition rate techniques: defining methodology and experimental protocols. **Biochimica et Biophysica Acta**, v.1367, p.88-106, 1998.

KOLBER, Z.; KLIMOV, D.; ANANYEV, G.; RASCHER, U.; BERRY, J.; OSMOND, B. Measuring photosynthetic parameters at a distance: laser induced fluorescence transient (LIFT) method for remote measurements of photosynthesis in terrestrial vegetation. **Photosynthesis Research**, v.84, p.121–129, 2005.

MUNNS, R.; JAMES, R.A.; SIRAUT, X.R.R.; FURBANK, R.T.; JONES, H.G. New phenotyping methods for screening wheat and barley for beneficial responses to water deficit. **Journal of Experimental Botany**, v.61, p.3499–3507, 2010.

MAXWELL, K.; JOHNSON, G.N. Chlorophyll fluorescence - a practical guide. **Journal of Experimental Botany**, v.51, p.659–668, 2000.

MEDRANO, H.; TOMÁS, M.; MARTORELL, S.; FLEXAS, J.; HERNÁNDEZ, E.; ROSSELLÓ, J.; ALICIA POU, A.; JOSÉ-MARIANO ESCALONA, J.M.; BOTA, J. 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, p.220–228, 2015.

MURCHIE, E.H.; LAWSON, T. Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. **Journal of Experimental Botany**, v.64, p.3983–3998, 2013.

MURCHIE, E.H.; HORTON, P. Acclimation of photosynthesis to irradiance and spectral quality British plant species: chlorophyll content, photosynthetic capacity and habitat preference. **Plant, Cell and Environment**, v.20, p.438-448, 1997.

MASSONNET, C.; COSTES, E.; RAMBAL, S.; DREYER, E.; RERGNARD, J.L. Stomatal Regulation of Photosynthesis in Apple Leaves: Evidence for Different Water-use Strategies between Two Cultivars. **Annals of Botany**, v.100, p.1347–1356, 2007.

NAVROSKI, M.C.; ARAÚJO, M.M.; CUNHA, F. S.; BERGHETTI, A.L.P.; PEREIRA, M. O. Influência do polímero hidrotentor na sobrevivência de mudas de *Eucalyptus dunnii* sob diferentes manejos hídricos. **Revista Nativa**, v.2, p.108-113, 2014.

PARRY, M.A.J.; ANDRALOJC, P.J.; KHAN, S.; LEA, P.J.; KEYS, A.J. Rubisco Activity: Effects of Drought Stress. **Annals of Botany**, v.89, p.833–839, 2002.

PIERUSCHKA, R.; KLIMOV, D.; BERRY, J.A.; OSMOND, C.B.; RASCHER, U.; KOLBER, Z.S. Remote Chlorophyll fluorescence measurements with the Laser-Induced Fluorescence Transient Approach. **Methods in Molecular Biology**, v.918, p.51-59, 2010.

PIERUSCHKA, R.; KLIMOV, D.; KOLBER, Z.S.; BERRY, J.A. Monitoring of cold and light stress impact on photosynthesis by using the laser induced fluorescence transient (LIFT) approach. **Functional Plant Biology**, v.37, p.395–402, 2010.

PIERUSCHKA, R.; ALBRECHT, H.; MULLER, O.; BERRY, J.A.; KLIMOV, D.; KOLBER, Z.S.; MALENOVSKÝ, Z.; RASCHER, U. Daily and seasonal dynamics of remotely sensed photosynthetic efficiency in tree canopies. **Tree Physiology** v.xx, p.1–12, 2014.

PEÑUELAS, J.; EILALLA, I.; GAMON, J.A. Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance. **New Phytologist.**, v.131, p.291-296, 1995.

YU, J.Y.; SHI, J. G.; MA, X.; DANG, P.F.; YAN, Y.L.; MAMEDOV, A.I.; SHAINBERG, I.; LEVY, G.J. Superabsorbent Polymer Properties and Concentration Effects on Water Retention under Drying Conditions. **Soil & Water Management & Conservation**, v.xx, p.889-901, 2017.

HOCHBERG, U.; ROCKWELL, F.E.; HOLBROOK, N.M.; COCHARD, H. Iso/Anisohydry: A Plant–Environment Interaction Rather Than a Simple Hydraulic Trait. **Trends in Plant Science**, v.xx, p.1-9, 2017.

HILL, C.B.; CHENGDAO LI, C. Genetic architecture of flowering phenology in cereals and opportunities for crop improvement. **Frontiers in Plant Science**, v.19, p.1-23, 2016.

PEÑUELAS, J.; EILALLA, I.; GAMON, J.A. Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance. **New Phytologist**, v.131, p.291-296, 1995.

PEÑUELAS, J.; Filella, I.; Biel C.; SERRANO, R.; SAVÉ, R. The reflectance at the 950-970nm region as an indicator of plant water status. **Int. J. Remote Sensing**, v.14, p.1887-1905, 1993.

PEÑUELAS, J.; FILELLA, I.; GAMONB, J.A.; FIELD, C. Assessing photosynthetic radiation-use efficiency of emergent aquatic vegetation from spectral reflectance. **Aquatic Botany**, v.58, p.307-315, 1997.

RAY, D.K.; GERBER, J.S.; MACDONALD, G.K.; WEST, P.C. Climate variation explains a third of global crop yield variability. **Nature Communications**, v.22, p.1-9, 2015.

RAUN., W.R.; SOLIE, J.B.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; LUKINA. E.V.; THOMASON, W.E.; SCHEPERS, J.S. In-Season Prediction of Potential Grain Yield in Winter Wheat Using Canopy Reflectance. **Agronomy Journal**, v.93, p.131-138, 2001.

REICHGELT, T.; ANDREA, W.J.D. Plant carbon assimilation rates in atmospheric CO₂ reconstructions. **New Phytologist**, v.223, p.1844-1855, 2019.

SENTELHAS, P.C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G.M.S.; FARIAS, J. R.B.; HAMPF, A.C.; NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. *Journal of Agricultural Science*, v.153, p.1394–1411, 2015.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; DOS ANJOS, L. H. C.; DE OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R., ALMEIDA, J.A DE; FILHO, J.C.A.; OLIVEIRA,

J.B.; CUNHA, T. J. F. (2018). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

TAUB, D.R. Effects of rising atmospheric concentrations of carbon dioxide on plants. *Nature Education Knowledge*, v.21,1p.-7, 2010.

TUZET, A.; PERRIER A.; LEUNING, R. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. **Plant, Cell and Environment**, v.26, p.1097–1116, 2003.

WESSELER, J.; POLITIEK, H.; ZILBERMAN, D. The economics of regulating new plant breeding technologies - implications for the bioeconomy illustrated by a survey among dutch plant breeders. **Frontiers in Plant Science**, v.10, p.1-8, 2019.

ZHAI, H.; FENG, Z.; LI, J.; LIU, X.; XIAO, S.; NI, Z.; QIXIN SUN, Q. QTL Analysis of spike morphological traits and plant height in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) using a high-density SNP and SSR-based linkage map. **Frontiers in Plant Science**, v.7, p.1-13, 2016.

Tabela 1. Análise de solo na área experimental no ano de 2016 nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm.

Profundidade (cm)	Al ⁺³ (cmolc dm ⁻³)	Ca ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	H+Al – (cmolc dm ⁻³)	K (cmolc dm ⁻³)	M.O. (g dm ⁻³)	Mg (cmolc dm ⁻³)	pH (H ₂ O)	P (mg/dm ³)	CTC(Total)	CTC (efetiva)	SB	V%
0-20	0,069	2,317	5,461	0,301	22,5	1,146	5,74	9,868	9,225	3,834	3,765	40,807
20-40	0,089	1,51	4,669	0,135	18,3	0,931	5,62	2,725	7,246	2,666	2,577	35,561

Tabela 2. Assimilação Líquida de CO₂ (A) (μmol CO₂ m⁻²s⁻¹), Condutância estomática (g_s) (mol H₂O m⁻²s⁻¹), Concentração interna de CO₂ (C_i) (μmol CO₂ m⁻²) e Transpiração (E) (mmol H₂O m⁻²s⁻¹), em três cultivares de soja sob 4 regimes hídricos (RH).

Variáveis		RH1		RH2		RH3		RH4	
A	BRS 5980IPRO	2,66	Ad	5,32	Ac	12,10	Ab	17,09	Aa
	NA 5909IPRO	3,39	Ad	5,72	Ac	13,75	Ab	18,32	Aa
	BRS 7280RR	3,31	Ad	5,61	Ac	13,23	Ab	19,03	Aa
g _s	BRS 5980IPRO	0,08	Ac	0,09	Ac	0,16	Ab	0,28	Aa
	NA 5909IPRO	0,05	Ac	0,09	Ac	0,19	Ab	0,29	Aa
	BRS 7280RR	0,06	Ac	0,07	Ac	0,14	Ab	0,29	Aa
C _i	BRS 5980IPRO	297,81	Aa	267,29	Abc	230,09	Ac	266,64	Aab
	NA 5909IPRO	261,67	Aa	250,08	Abc	248,05	Ac	265,81	Aab
	BRS 7280RR	285,17	Aa	233,11	Abc	219,01	Ac	258,54	Aab
E	BRS 5980IPRO	1,98	Ac	2,36	Ac	3,65	Ab	5,52	Aa
	NA 5909IPRO	1,50	Ac	2,26	Ac	4,31	Ab	5,83	Aa
	BRS 7280RR	1,80	Ac	2,02	Ac	3,60	Ab	5,70	Aa

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas colunas e minúscula nas linhas para cada variável, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 3. Rendimento Quântico Máximo do Fotossistema II (F_v/F_m), Rendimento Quântico Efetivo do Fotossistema II (F_v'/F_m' e Φ FSII), Taxa de Transporte de Elétrons (ETR_t), Quenching de Extinção Fotoquímica (qP), Quenching de Extinção Não-Fotoquímica (qN e NPQ) em três cultivares de soja sob 4 regimes hídricos (RH).

Variáveis		RH1		RH2		RH3		RH4	
F_v/F_m	BRS 5980IPRO	0,737	Ac	0,768	Ab	0,812	Aa	0,796	Aab
	NA 5909RG	0,736	Ac	0,790	Ab	0,810	Aa	0,804	Aab
	BRS 7280RR	0,757	Ac	0,799	Ab	0,823	Aa	0,810	Aab
F_v'/F_m'	BRS 5980IPRO	0,453	Ac	0,478	Abc	0,553	Aab	0,551	Aa
	NA 5909RG	0,436	Ac	0,466	Abc	0,488	Aab	0,553	Aa
	BRS 7280RR	0,356	Ac	0,447	Abc	0,501	Aab	0,540	Aa
Φ PSII	BRS 5980IPRO	0,060	Ab	0,106	Ab	0,207	Aa	0,247	Aa
	NA 5909RG	0,094	Ab	0,124	Ab	0,206	Aa	0,236	Aa
	BRS 7280RR	0,067	Ab	0,101	Ab	0,227	Aa	0,238	Aa
ETR_t	BRS 5980IPRO	31,747	Ab	54,860	Ab	111,071	Aa	134,379	Aa
	NA 5909RG	49,623	Ab	64,469	Ab	107,955	Aa	129,277	Aa
	BRS 7280RR	32,065	Ab	54,084	Ab	119,464	Aa	126,797	Aa
qP	BRS 5980IPRO	0,132	Ac	0,251	Ab	0,398	Aa	0,451	Aa
	NA 5909RG	0,168	Ac	0,228	Ab	0,448	Aa	0,514	Aa
	BRS 7280RR	0,175	Ac	0,237	Ab	0,434	Aa	0,423	Aa
qN	BRS 5980IPRO	0,750	Aa	0,714	Ba	0,707	Ba	0,733	Ba
	NA 5909RG	0,696	Ba	0,808	Aa	0,769	Aa	0,746	Aa
	BRS 7280RR	0,844	ABa	0,822	ABa	0,788	ABa	0,743	ABa
NPQ	BRS 5980IPRO	1,841	ABa	1,669	Ba	1,492	Ba	1,526	Ba
	NA 5909RG	1,312	Ba	2,177	Aa	1,824	Aa	1,667	Aa
	BRS 7280RR	3,212	Aa	2,819	ABa	2,085	ABa	1,835	ABa

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas colunas e minúscula nas linhas para cada variável, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 4. Densidade de Grãos (DG - Kg m⁻³), Peso de Mil Grãos (PMG) (g), Número de Vagens (NV – NV planta⁻¹), Número de Entre-Nós (NEN - NEN planta⁻¹), Diâmetro do Coletor (D) (Kg m⁻³), Altura (H – cm) e Produtividade (Kg ha⁻¹) em três cultivares de soja sob 4 regimes hídricos (RH).

Variáveis		RH1		RH2		RH3		RH4	
DG	BRS 5980IPRO	711,5	Aa	715,5	Aa	720,5	Aa	722,7	Aa
	NA 5909RG	732,5	Aa	697,2	Aa	695,3	Aa	707,2	Aa
	BRS 7280RR	671,2	Ab	711,2	Aa	716,2	Aa	703,7	Aa
PMG	BRS 5980IPRO	78,34	Bc	85,98	Cbc	92,52	Cab	103,40	Ba
	NA 5909RG	98,14	Ad	109,30	Bc	125,46	Ab	143,36	Aa
	BRS 7280RR	103,13	Ac	120,10	Ab	116,27	Bb	141,99	Aa
NV	BRS 5980IPRO	6,58	Ab	12,13	Ab	24,43	Aa	22,43	Aa
	NA 5909RG	5,63	Ab	9,70	Ab	16,73	Ba	18,15	Aba
	BRS 7280RR	5,60	Ac	12,58	Ab	19,57	Abab	18,00	Ba
NEN	BRS 5980IPRO	7,92	Ad	9,47	Ac	11,25	Ab	12,06	Aa
	NA 5909RG	7,00	Ad	8,68	Ac	10,82	Ab	12,08	Aa
	BRS 7280RR	8,20	Ad	9,55	Ac	11,60	Ab	12,20	Aa
D	BRS 5980IPRO	3,93	Ac	4,78	Ab	5,50	Aa	5,59	Aa
	NA 5909RG	3,88	Ac	4,90	Ab	5,58	Aa	5,35	Aa
	BRS 7280RR	3,99	Ac	4,53	Ab	5,36	Aa	5,48	Aa
H	BRS 5980IPRO	18,87	Bc	30,34	Bb	42,25	Ba	40,71	Ba
	NA 5909RG	19,84	Bc	31,08	Bb	42,30	Ba	45,37	Ba
	BRS 7280RR	31,52	Ac	47,02	Ab	66,74	Aa	72,80	Aa
Produtividade	BRS 5980IPRO	522,13	Bd	1314,67	Bc	2302,33	Bb	2768,43	Ba
	NA 5909RG	513,12	Bd	1463,53	Ac	2837,22	Ab	3423,32	Aa
	BRS 7280RR	541,05	Ad	1499,62	ABc	2389,30	ABb	2938,30	ABa

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas colunas e minúscula nas linhas para cada variável, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 5. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Índice Fotoquímico de Reflectância (PRI), Taxa de Transporte de Elétron medida pelo LIFT (ETR_L) e Rendimento Quântico Efetivo do Fotossistema II (F_q'/F_m') em três cultivares de soja sob 4 regimes hídricos (RH).

Variáveis		RH1		RH2		RH3		RH4	
NDVI	BRS 5980IPRO	0,175	Bd	0,315	Bc	0,419	Bb	0,486	Ba
	NA 5909RG	0,225	Ad	0,354	Ac	0,497	Ab	0,544	Aa
	BRS 7280RR	0,194	Bd	0,310	Bc	0,446	Bb	0,536	Ba
PRI	BRS 5980IPRO	0,147	Bc	0,189	Bb	0,221	Ba	0,233	Ba
	NA 5909RG	0,141	Bc	0,190	Bb	0,229	Ba	0,235	Ba
	BRS 7280RR	0,158	Ac	0,195	Ab	0,236	Aa	0,240	Aa
F _q '/F _m '	BRS 5980IPRO	0,363	Bd	0,392	Bc	0,473	Bb	0,491	Ba
	NA 5909RG	0,383	ABd	0,425	ABc	0,504	ABb	0,507	ABa
	BRS 7280RR	0,379	Ad	0,393	Ac	0,480	Ab	0,517	Aa

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas colunas e minúscula nas linhas para cada variável, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 6. Eficiência no Uso da Água (Water Use Efficiency - WUE) ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$), Eficiência Intrínseca no Uso da Água (Intrinsic Water Use Efficiency - iWUE) ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$), Potencial hídrico da ante-manhã (ψ_w) (MPa) e Conteúdo de prolina nas folhas (Prolina) ($\mu\text{mol g}^{-1} \text{ PF}$) em três cultivares de soja sob 4 regimes hídricos (RH).

Variáveis		RH1		RH2		RH3		RH4	
WUE	BRS 5980IPRO	48,679	Ac	67,472	Aab	90,312	Aa	65,766	Abc
	NA 5909RG	73,610	Ac	78,468	Aab	78,299	Aa	64,988	Abc
	BRS 7280RR	55,398	Ac	82,958	Aab	95,573	Aa	68,851	Abc
iWUE	BRS 5980IPRO	1,759	Ac	2,463	Ab	3,661	Aa	3,261	Aa
	NA 5909RG	2,397	Ac	2,725	Ab	3,229	Aa	3,205	Aa
	BRS 7280RR	1,858	Ac	2,777	Ab	3,675	Aa	3,441	Aa
Prolina	BRS 5980IPRO	0,103	Aa	0,094	Aa	0,125	Aa	0,118	Aa
	NA 5909RG	0,127	Aa	0,119	Aa	0,111	Aa	0,110	Aa
	BRS 7280RR	0,111	Aa	0,093	Aa	0,117	Aa	0,100	Aa

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula nas colunas e minúscula nas linhas para cada variável, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

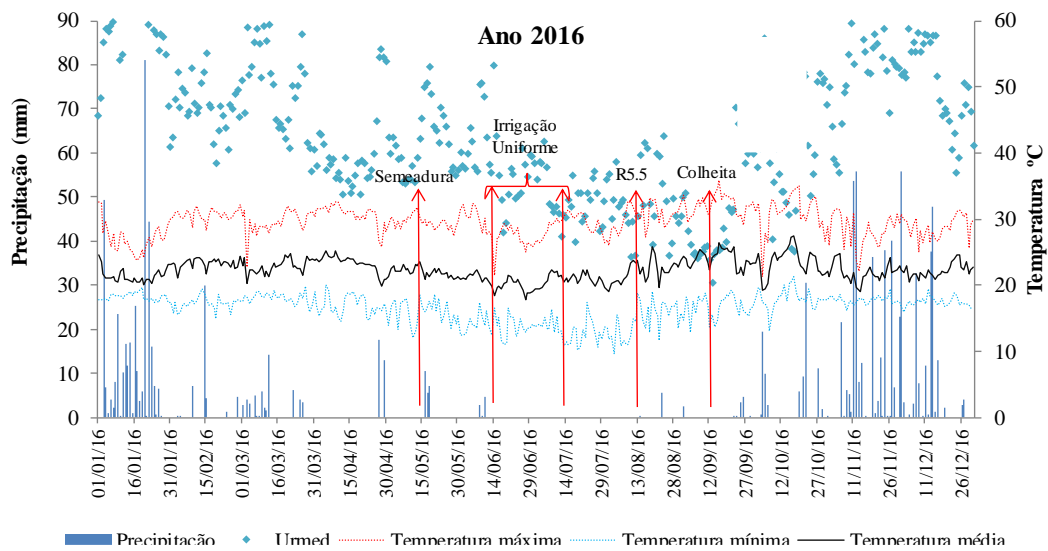


Figura 1. Precipitação, Umidade relativa média (Urmed), Temperatura máxima, Temperatura mínima e Temperatura mínima no ano de 2016. As setas vermelhas indicam as datas em que ocorreram a sementeira, o período de irrigação uniforme, a fase fenológica de análise e a colheita.

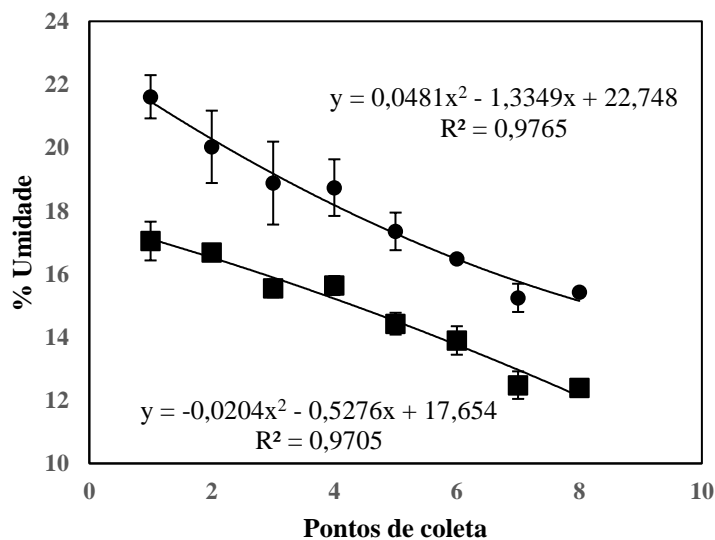


Figura 2. Umidade do solo em oito pontos, com intervalos de 2 metros entre cada ponto. Quadrados cheios representam a umidade na profundidade de 0-20 cm e círculos cheios, de 20-40 cm, com R^2 de 0,97 e 0,95, respectivamente.

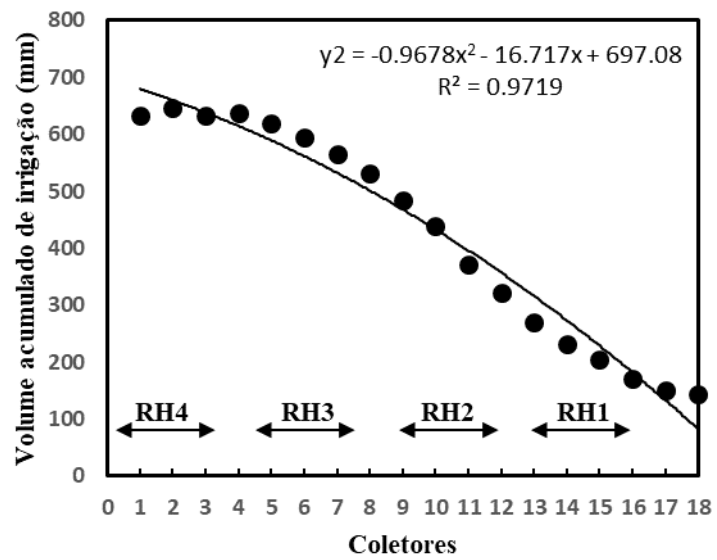


Figura 3. Volume de irrigação acumulado aplicado na cultura da soja durante a estação de seca em 2016.

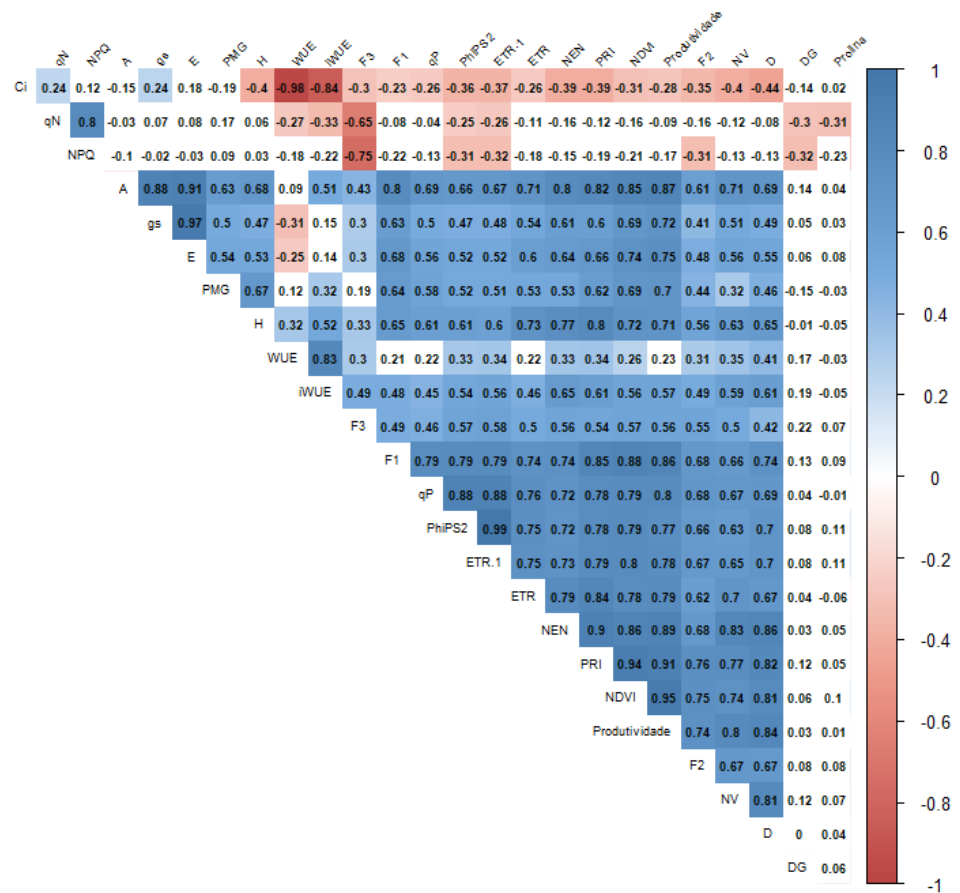


Figura 4. Análise da correlação linear de Pearson com 5% de significância entre as variáveis Assimilação Líquida de CO₂ (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Condutância Estomática (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Concentração Interna de Carbono (C_i) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}$), Transpiração (E) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Peso de Mil Grãos (PMG) (g), Número de Vagens (NV), Número de Entre Nós (NEN), Diâmetro (D) (mm), Altura (H) (cm), Densidade de Grãos (DG), Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Taxa de Transporte de Elétons (LIFT) (ETR), Taxa de Transporte de Életrons (IRGA) (ETR₁), Índice Fotoquímico de Reflectância (PRI), Rendimento Quântico Efetivo do Fotossistema II (F_q'/F_m' ; F1), Rendimento Quântico Efetivo do Fotossistema II (Φ_{FSII} e F_v'/F_m' IRGA; F2), Rendimento Quântico Máximo do Fotossistema II (F_v/F_m IRGA; F3), Eficiência Instantânea (WUE) ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$) e Instrínseca (iWUE) ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$) no uso da água, *Quenching* de Extinção Fotoquímica (qP) e Não Fotoquímica (qN e NPQ).

Variáveis de maior importância na ACP		
	Dim.1	Dim.2
NDVI	0,95	0,097
PRI	0,95	0,022
ETR _L	0,85	0,077
F1 (F _q '/F _m '')	0,89	0,121
A	0,87	0,297
g _s	0,66	0,586

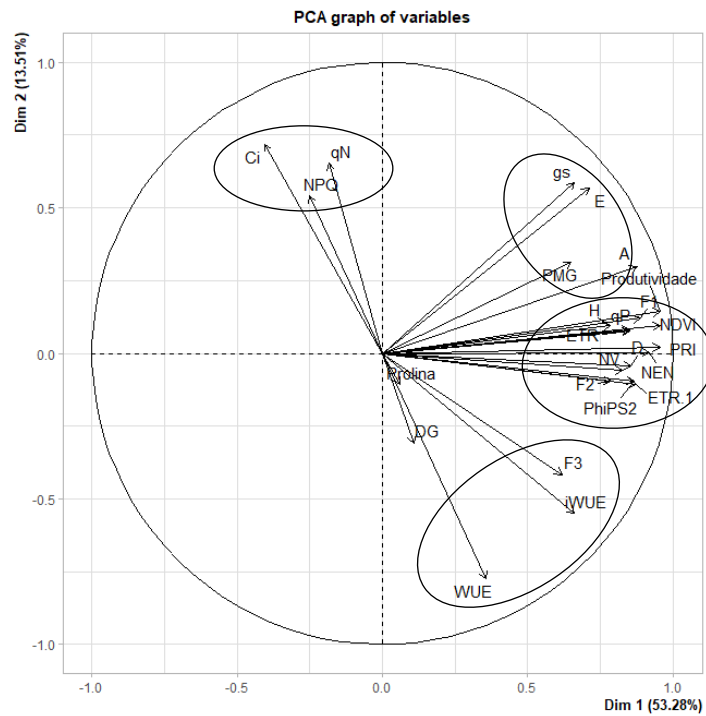


Figura 5. Análise de Componentes principais (ACP) para as variáveis Assimilação Líquida de CO₂ (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Condutância Estomática (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Concentração Interna de Carbono (C_i) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}$), Transpiração (E) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Peso de Mil Grãos (PMG) (g), Número de Vagens (NV), Número de Entre Nós (NEN), Diâmetro do Coleto (D) (mm), Altura (H) (cm), Densidade de Grãos (DG) (Kg m^{-3}), Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Taxa de Transporte de Elétrons (LIFT) (ETR), Taxa de Transporte de Elétrons (IRGA) (ETR₁), Índice Fotoquímico de Reflectância (PRI), Rendimento Quântico Efetivo do Fotossistema II (F_q'/F_m''); F1), Rendimento Quântico Efetivo do Fotossistema II (Φ_{FSII} e F_v'/F_m'_{IRGA}; F2), Rendimento Quântico Máximo do Fotossistema II (F_v/F_m IRGA; F3), Eficiência Instantânea (WUE) ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$) e Intrínseca (iWUE) ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$) no uso da Água, *Quenching* de Extinção Fotoquímica (qP) e não Fotoquímica (qN e NPQ). Valores percentuais de contribuições das principais variáveis resposta.

**CAPÍTULO 2. IMPACTO DO SUPRIMENTO DE POLÍMERO NA FOTOSÍNTESE E
PRODUTIVIDADE DE SOJA SOB DIFERENTES REGIMES HÍDRICOS**

IMPACTO DO SUPRIMENTO DE POLÍMERO NA FOTOSSÍNTESE E PRODUTIVIDADE DE SOJA SOB DIFERENTES REGIMES HÍDRICOS

RESUMO: Para praticar uma agricultura sustentável e eficiente é essencial o uso de novas tecnologias, como polímeros de retenção de água. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de um polímero incorporado ao solo nas trocas gasosas e na produtividade da soja sob diferentes regimes hídricos (RH) e em três fases fenológicas do desenvolvimento da soja (R3, R5.1 e R5.5). O experimento foi conduzido na Embrapa Cerrados em condições de campo nos anos de 2016 e 2017, com três cultivares (BRS 5980IPRO, NA 5909RG e BRS 7280RR), submetidas a quatro RH (167 mm, 237 mm, 341 mm e 534 mm em 2017; RH1, RH2, RH3 e RH4, respectivamente), com e sem polímero. Em 2016 foram avaliadas a assimilação líquida de CO₂ (*A*), transpiração (*E*), condutância estomática (*g_s*) e Produtividade. Não houve diferença estatística entre Controle e Polímero em 2016, e a maioria das reduções em *A* e *E* pela adição de polímero pode ser atribuída ao fechamento estomático, mas essas reduções não influenciaram a produtividade. A produtividade em 2017 foi maior utilizando o Polímero em RH3 e RH4 em 39 e 41% para a cultivar BRS 5980IPRO; 20 e 42% para a cultivar NA 5909RG e 37 e 40% para a cultivar BRS 7280RR, respectivamente. O aumento da produtividade possivelmente ocorreu devido a maiores valores de *A*, *g_s* e *E* nas plantas tratadas com Polímero. Sob condições de estresse mais severo (RH1 e RH2), as trocas gasosas foram reduzidas na presença de Polímero, mas não provocou redução da produtividade. Esses resultados indicam que o uso do polímero contribuiu para o prolongamento da atividade fotossintética durante a fase reprodutiva da soja e pode representar uma estratégia potencial para aumentar a produtividade sob condições moderadas de estresse hídrico.

Palavras-chave: Glycine max, fotossíntese, polímero, seca e fenologia.

THE IMPACT OF POLYMER ON THE PRODUCTIVITY AND PHOTOSYNTHESIS OF SOYBEAN UNDER DIFFERENT WATER LEVELS

ABSTRACT: To practice sustainable and efficient agriculture, the use of new technologies, such as water retention polymers, is essential. The aim of this study was to evaluate the influence of a polymer incorporated into the soil in gas exchange and soybean productivity under different water regimes (WR) and in three phenological phases of soybean development (R3, R5.1 and R5.5). The experiment was conducted at Embrapa Cerrados under field conditions in 2016 and 2017, with three cultivars (BRS 5980IPRO, NA 5909RG and BRS 7280RR), subjected to four WR (167 mm, 237 mm, 341 mm and 534 mm in 2017; WR1, WR2, WR3 and WR4, respectively), with and without polymer. In 2016, net CO₂ assimilation (*A*), transpiration (*E*), stomatal conductance (*g_s*) and productivity were evaluated. There was no statistical difference between Control and Polymer in 2016, and most of the reductions in *A* and *E* through the addition of polymer can be attributed to stomatal closure, but these reductions did not influence productivity. The productivity in 2017 was higher with Polymer in WR3 and WR4 by 39 and 41% for the cultivar BRS 5980IPRO; 20 and 42% for cultivar NA 5909RG and 37 and 40% for cultivar BRS 7280RR, respectively. The increase in productivity possibly occurred due to higher *A*, *g_s* and *E* in plants treated with Polymer. Under more severe stress (WR1 and WR2), gas exchange were reduced in the presence of Polymer, but this did not translate into reductions in productivity. These results indicate that the use of the polymer contributed to the prolongation of photosynthetic activity during the soybean reproductive phase and may represent a potential strategy to increase productivity under moderate water stress conditions.

Keywords: *Glycine max*, photosynthesis, polymer, drought and phenology.

2.1. INTRODUÇÃO

A soja ocupa mais de 28 milhões de ha do território nacional brasileiro e contribui com 2,6% para o produto interno bruto (PIB) nacional (OLIVEIRA, 2016). A disseminação de seu cultivo para os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia trouxe alguns desafios, principalmente os associados à inconstância climática (CATTELAN; DALL'AGNOL, 2018). No Brasil, embora a soja seja cultivada durante a estação chuvosa, estresses abióticos como a seca podem afetar qualquer uma das fases fenológicas da cultura (BRACCINI et al., 1999; SARTE et al., 2017).

A falta de água pode reduzir o crescimento da cultura e a produção de fotoassimilados, além de alterações nas relações fonte / dreno que podem afetar negativamente a produtividade (MULLER et al., 2011). A seca também pode influenciar a duração total do ciclo da cultura, encurtando suas fases vegetativa e reprodutiva e afetando diretamente sua produtividade (BOARD; KAHLON, 2011). Nos casos em que a seca ocorre por período prolongado, seus efeitos podem se tornar irreversíveis, resultando em menor crescimento das plantas e menor produtividade (NIINEMETS et al., 2012; FELLER, 2016).

Como estratégia tecnológica, os polímeros superabsorventes já estão sendo utilizados em culturas perenes, a fim de facilitar seu estabelecimento adequado (BODNER et al., 2015; FELIPPE et al., 2016) e também há potencial para seu uso nas culturas anuais. Podem ser utilizados para fornecer água a plantas recém-transplantadas durante um período crítico em que a cultura está crescendo rapidamente (MIKKELSEN, 1994).

As culturas perenes geralmente apresentam taxas de crescimento relativo mais baixas do que as culturas anuais, que devem necessariamente, completar seu ciclo em um período de poucos meses (JAMNICKÁ et al., 2013; FELIPPE et al., 2016). Assim, as culturas anuais

podem exigir mais água em um período mais curto de tempo, de modo que a água retida nos polímeros pode ter um impacto sobre o metabolismo fotossintético, especialmente em condições de seca. No entanto, os benefícios potenciais destes polímeros em culturas anuais sob estresse hídrico ainda são pouco esclarecidos.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da incorporação de um polímero superabsorvente de água aplicado no solo nas trocas gasosas, parâmetros de fluorescência da clorofila *a* e produtividade de cultivares de soja submetidas a quatro regimes hídricos em uma única fase fenológica (R5.5) em 2016 e em três fases fenológicas (R3, R5.1 e R5.5) em 2017.

2.2 MATERIAL E METODOS

O experimento foi conduzido em condições de campo na Embrapa Cerrados, unidade da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, em Planaltina (15°35'30"S, 47°42'30" W), Brasil, entre julho e novembro nos anos de 2016 e 2017, período com precipitação extremamente baixa, ideal para a avaliação de experimentos sob déficit hídrico. A região possui precipitação média anual de 1500 mm ± 500 mm e seu clima dominante é tropical, quente e úmido, Aw, de acordo com a classificação de Köppen (Alvares et al., 2013). A temperatura e a precipitação na área experimental durante os anos de 2016 e 2017 são apresentadas nas Figuras 1 e 2. O solo é classificado como Latossolo vermelho (SANTOS et al., 2008). Antes da instalação do experimento, a análise do solo foi realizada nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm (Tabela 1).

O delineamento experimental nos anos 2016 e 2017 foi de blocos casualizados, com três repetições, em esquema de parcelas subdivididas. As parcelas foram compostas por cultivares de soja (BRS 5980IPRO, NA 5909RG e BRS 7280RR) e as subparcelas foram os quatro regimes hídricos diferentes (RH). O espaçamento entre linhas foi de 50 cm e a densidade de

plântio foi de 25 plantas por metro linear. Cada parcela consistiu de duas linhas centrais, eliminando 1,5 m de borda. Os RH descritos abaixo foram obtidos utilizando uma barra de irrigação por aspersão de 18 m de largura (IrrigaBrasil modelo 36/42), conectada a um autopropelido TurboMq 75/GB, com velocidade ajustável de acordo com a quantidade de água a ser aplicada.

A irrigação de todas as cultivares foi uniforme por 35 dias após a emergência (DAE) em 2016 e 2017. Durante a fase de irrigação uniforme (14 de junho a 14 de julho de 2016 e 27 de julho a 27 de agosto de 2017) foram fornecidos aproximadamente 157 e 161 mm de água, em 2016 e 2017, respectivamente. Após esse período, a metodologia “line source” foi adotada (HANKS et al., 1976), modificada pelo uso de uma barra de irrigação de 18 m de largura. Esse sistema de irrigação usa aspersores com diferentes vazões cuja sobreposição é usada para criar níveis decrescentes de água a partir da área central até o final da barra (Figura 3).

Ao longo da barra foram delimitados quatro níveis de irrigação, representando os diferentes RH. O nível acumulado de água aplicada nos 110 dias do ciclo da cultura em 2016, dos aspersores mais externo para o mais interno, foi de 157 mm (16 m), 263 mm (13 m), 432 mm (10 m) e 630 mm (4 m), referidos como RH1, RH2, RH3 e RH4, respectivamente e durante os 118 dias do ciclo da cultura em 2017 foram 167 mm (16 m), 237 mm (13 m), 341 mm (10 m) e 534 mm (4 m), também referidos como RH1, RH2, RH3 e RH4, respectivamente (Figura 3). Os números entre parênteses indicam a distância dos RH em relação ao início da barra de irrigação nos dois anos.

A irrigação foi realizada a cada cinco dias e o maior RH foi aplicado de acordo com o programa de monitoramento para reposição da evapotranspiração da cultura (EMBRAPA, 2011). Os efeitos da aplicação de um polímero superabsorvente foram testados em 2016 e 2017. Esse polímero é um composto artificial semelhante a partículas aniônicas de acrilamida e

acrilatos de potássio, um composto inerte que pode armazenar água em sua matriz, tornando-se um gel. É capaz de armazenar em sua matriz até quatrocentas vezes seu peso em água deionizada e cento e cinquenta vezes seu peso em água quando no solo. Tem uma densidade aparente de 0,85, peso específico de $1,10 \text{ g cm}^{-3}$ e pH de 8,1. Quando seco, tem a aparência de um pó branco e quando hidratado tem a consistência de um gel. Possui uma capacidade de troca catiônica (CTC) de $4,6 \text{ meq g}^{-1}$, vida útil após aplicação de 5 anos e não apresenta toxicidade. Pode ser aplicado ao solo durante a semeadura juntamente com os fertilizantes.

A adubação de plantio foi de 300 Kg ha^{-1} do formulado 02-20-15. Nas parcelas com adição de polímero, foram aplicados 30 Kg ha^{-1} nos anos de 2016 e 2017 no sulco de semeadura. As sementes de soja foram inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* ($1 \times 10^9 \text{ UFC g}^{-1}$ inoculante) a 200 g por 50 Kg de sementes.

No ano de 2016, as avaliações foram realizadas somente aos 75 DAE, quando a cultura encontrava-se na fase R5.5 (Figura 1). Em 2017, o experimento foi avaliado aos 52, 62 e 76 DAE, quando a cultura estava nas fases R3, R5.1 e R5.5, respectivamente (Figura 2). Para a caracterização de cada fase fenológica, foi utilizada a Circular Técnica da Embrapa nº 48 (Farias et al., 2007). As variáveis de trocas gasosas: taxa líquida de assimilação de CO_2 (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), condutância estomática (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e taxa de transpiração (E) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) foram estimadas nas cultivares de soja das 9:00 às 13:00 h (hora solar), sob $1200 \mu\text{mol de fóton m}^{-2} \text{ irradiância s}^{-1}$ e uma concentração externa de CO_2 (C_a) de $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de ar.

A eficiência quântica efetiva do Fotossistema II (FSII) (ΦFSII) (Genty et al., 1989; Maxwell e Johnson, 200) foi calculada usando a fórmula: $\Phi\text{FSII} = (F_m' - F_s') / F_m'$ e taxa de transporte de elétrons (“electron transporte ratio” - ETR) (Baker, 2008) foi calculada usando a fórmula: $\text{ETR} = \Phi\text{PSII} \times \text{DFE} \times (0,84) \times (0,5)$, em que DFE é a densidade do fluxo de fótons ou a quantidade de luz absorvida ($\mu\text{m fótons m}^{-2}\text{s}^{-1}$) (Baker, 2008). Todas as medições nos dois

anos de avaliações foram feitas com um sistema portátil de trocas gasosas de fluxo aberto (LI-6400XT; LI-COR Inc., Lincoln, NE).

A produtividade (Kg ha^{-1}) foi avaliada pela colheita de quatro metros lineares da área plantada nos anos de 2016 e 2017, desconsiderando 1,5 m das extremidades de cada parcela colhida. A Produtividade em ambos os anos foi estimada a partir da colheita de duas linhas de dois metros lineares de cada parcela. Foi determinada a umidade dos grãos através do equipamento Gehaka modelo G810 e a produtividade foi padronizada para 13%.

Para avaliar a influência do suprimento do polímero, foi realizada a análise de grupos de experimentos e em cada grupo (Controle e Polímero), as variáveis de resposta foram avaliadas. Em cada ano (2016 e 2017) foi analisado e seus resultados foram descritos separadamente. Em 2016, as avaliações foram feitas apenas na fase fenológica R5.5, já em 2017 foram avaliadas as fases fenológicas R3, R5.1 e R5.5 submetidas à diferentes RH foram analisadas para tratamentos Controle e Polímero. Além disso, a influência do RH nos tratamentos Controle e Polímero no ciclo fenológico em 2017 e a resposta de cada genótipo foram testadas separadamente. Os dados obtidos foram submetidos ao teste de normalidade Shapiro-Wilk, que os considerou normais, ainda, foi realizado o teste F de Hartley ($QM_{res1} / QM_{res} \leq 7$), o que permitiu verificar que todas as variáveis dos dois grupos poderiam ser comparadas. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. As fontes de variação foram cultivares (parcelas), RH (subparcelas) e fases fenológicas dentro de cada grupo de experimentos com e sem polímero.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Efeito do suprimento do polímero em 2016

De forma geral, a adição de Polímero ao solo promoveu diminuição nas trocas gasosas no ano de 2016 (Tabela 2; Figura 4). O suprimento do Polímero no ano de 2016 promoveu reduções significativas em A no RH4 de 15% somente para a cultivar BRS 7280RR (Tabela 2). Foram obtidas reduções em A na ordem de 40, 52 e 37% nas cultivares BRS 5980IPRO, NA 5909RG e BRS 7280RR, respectivamente para o RH3 (Tabela 2). No RH2 o tratamento com Polímero causou reduções de 31% somente para a cultivar BRS 7280RR, já para o RH1 não houve diferenças estatísticas em A entre o Controle e Polímero em nenhuma das cultivares (Tabela 2). Todos os RH diferiram para g_s e E nas três cultivares estudadas, e o suprimento com Polímero proporcionou valores estatisticamente menores (Tabela 2; Figura 4).

Foram obtidas diferenças estatísticas significativas no F_v/F_m somente para a cultivar BRS 5980IPRO nos RH1 e RH2, em que o tratamento com Polímero proporcionou valores superiores de 0,76 e 0,80 respectivamente. Para o F_v'/F_m' , somente o RH3 apresentou valores estatisticamente superiores de 0,57, 0,53 e 0,53 para BRS 5980IPRO, NA 5909RG e BRS 7280RR, respectivamente (Tabela 2).

O suprimento com Polímero no primeiro ano de aplicação ano pouco contribuiu para o potencial bioquímico da soja, uma vez que sintomas de fotoinibição (TAKAGI et al., 2019) não foram observados independentemente do suprimento com Polímero (Tabela 2). Não houve diferenças entre Controle e Polímero para F_v/F_m dentro da maioria dos RH avaliados, especialmente nos mais estressados (RH1 e RH2) (Table 2). A única exceção, foi observada para a cultivar BRS 5980IPRO com valores superiores ao controle (0,76 e 0,80 para RH1 e RH2, respectivamente) (Table 2), demonstrando que possivelmente esta cultivar possua menor resistência à seca severa, mas por outro lado, maior capacidade de responder fisiologicamente a um possível aumento na quantidade de água no solo através do Polímero (YANG et al., 2006).

Os dados de fluorescência da clorofila *a*, demonstram que as limitações bioquímicas não promovem drásticas reduções no metabolismo primário (tais como reduções em *A*), uma vez que o F_v'/F_m' no tratamento com Polímero não foi afetado (BRODRIBB; MCADAM, 2017), pelo contrário, aumentou (Tabela 2), mas sim o expressivo fechamento estomático, como observado em todos os RH avaliados (Tabela 2; Figura 4). É importante salientar que as avaliações aconteceram na fase R5.5 e autores como Pejić et al. (2011) relatam que nesta fase acontece o ápice do enchimento de grãos, e assim um aumento substancial na demanda por fotoassimilados, tornando este estágio fenológico essencial para a construção da produtividade na soja. Assim, quaisquer restrições ao influxo de CO₂ podem comprometer a performance produtiva em condições de estresse (BAKER, 2008). No entanto, mesmo que os estômatos se mantivessem fechados e algum dano metabólico pudesse ter ocorrido, não houve diferença na produtividade nos RH para Controle e Polímero (Figura 5). Neste primeiro ano, os possíveis fatores tempo de reação e possível dependência de um efeito residual, podem ter limitado o auxílio a cultura da soja através da retenção de água para que, em condições de seca, a mesma pudesse manter ou aumentar seu potencial fotossintético, mas os reflexos de tais limitações fotossintéticas não se converteram em reduções na produtividade (Figura 5).

Como grande parte dos experimentos que envolvem polímeros em culturas anuais de interesse agrônômico é realizada em casa de vegetação (YU et al., 2017) e assim, todos os fatores de ordem ambiental podem facilmente ser controlados, trabalhos em condições de campo têm como objetivo sanar a dúvida sobre a eficácia de tais tecnologias. Nestas condições, variáveis como o tipo do solo, manejo cultural e condições climáticas podem limitar sua eficácia (MALLEKIAN, 2012). De fato, não é comum o uso de polímeros em culturas anuais, e assim, os dados demonstram que no primeiro ano de aplicação nenhuma diferença em produtividade em relação ao Controle foi observada, independentemente do RH (Figura 5).

Influência do regime hídrico em 2016

Em geral foi observada redução de A , g_s e E à medida em que se reduzia a lâmina de água aplicada para as três cultivares de soja, analisando-se individualmente os grupos de experimentos Controle e Polímero (Tabela 2). Os RH1, RH2 e RH3, sob déficit hídrico, foram comparados em relação ao nível ótimo de irrigação, o RH4. Para A , o RH3 apresentou reduções estatisticamente significativas de 11 a 18% para o Controle e 39 a 52% para o Polímero, já nos RH1 e RH2 as reduções alcançaram até 88% em ambos (Controle e Polímero), de forma geral, nas três cultivares estudadas (Figura 4). As reduções em g_s no RH3 foram de 26 a 41% no Controle e de 48 a 64% no Polímero. Nos demais RHs, as reduções em g_s chegaram a 82% no Controle e 85% no Polímero (Figura 4). Para E , o RH3 apresentou reduções de 16 a 29% no Controle e 39 a 55% no Polímero. Nos demais RH, as reduções atingiram até 72% no Controle e 77% no Polímero (Tabela 4).

Os dados de fluorescência da clorofila a corroboram os dados de trocas gasosas, uma vez que reduções significativas foram observadas (Tabela 2) nos tratamentos Controle e Polímero, também de acordo com o RH (Tabela 2). As maiores reduções no F_v/F_m foram observadas no RH1 para todas as cultivares independente do suprimento com Polímero, mas não houve diferença estatística entre o RH1 e RH2 para as cultivares BRS 5980IPRO e BRS 7280RR, que possivelmente sofreram sintomas de fotoinibição, para estas, o RH1 foi estatisticamente menor que o RH3 (Tabela 2). Na cultivar NA 5909RG as reduções no F_v/F_m foram a partir do RH2. Pôde-se separar os RH em grupos estatisticamente semelhantes para F_v'/F_m' , as cultivares BRS 5980IPRO e BRS 7280RR apresentaram médias em que os RH3 e RH4 apresentaram médias estatisticamente superiores ao RH1 para Controle e Polímero. Para a cultivar NA 5909RG o RH1 diferiu apenas do RH4 (Tabela 2).

A partir das reduções no F_v/F_m , foi possível identificar sintomas de fotoinibição causados pela seca, principalmente no RH1 (Table 2). Desta forma, danos celulares em importantes proteínas responsáveis pelos eventos fotossintéticos possivelmente ocorreram e um destes está relacionado a proteína D1 do fotossistema II (KEREN et al., 1997). Esta proteína está envolvida nos processos de fotólise da água, e o excedente do poder redutor produzido na etapa fotoquímica da fotossíntese causou danos celulares e produziu espécies reativas de oxigênio, debilitou o sistema de desintoxicação celular, reduzindo assim o potencial fotossintético da soja (BAKER, 2008). Como as cultivares BRS 5980IPRO e BRS 7280RR apresentaram diferenças estatísticas no F_v/F_m no RH3 em relação ao RH1, pode-se inferir que as mesmas possuem certa dificuldade em se recuperar de tensões ambientais em relação a cultivar NA 5909RG. Mas ao longo do dia, o F_v'/F_m' pôde indicar que a cultivar NA 5909RG sofreu limitações bioquímicas mesmo em RH em déficit hídrico moderado, como o RH3, que não diferiu do RH1 (Tabela 2). No RH1 e RH2, as reduções em parâmetros como A , E e Produtividade podem ser explicadas pelas reduções em g_s e danos metabólicos associados a reduções em F_v'/F_m' e F_v/F_m (GENTY et al., 1989; MAXWELL; JOHNSON, 2000; ROHÁČEK et al., 2008; PIERUSCHKA et al., 2014).

Efeitos da adição do polímero nos parâmetros fisiológicos no ano de 2017

Houve diferenças significativas entre os tratamentos Controle e Polímero para A , g_s e E nas três cultivares de soja, dependendo do RH e da fase fenológica. Neste tópico será analisado somente o efeito do suprimento do Polímero (Tabela 3). No RH4, o maior nível de irrigação, a presença de Polímero no solo aumentou A em 16, 31 e 23% para as cultivares BRS 5980IPRO, NA 5909RG e BRS 7280RR, respectivamente, durante a fase R5.5 (Tabela 3). Para E , incrementos de 10, 26 e 14% ocorreram para as cultivares BRS 5980IPRO, NA 5909RG e BRS

7280RR, respectivamente, sob tratamento com Polímero, enquanto não foram observados efeitos significativos sobre as g_s (Tabela 3).

O Φ PSII foi afetado com a adição de Polímero, os maiores resultados no RH4 foram encontrados nas fases R3 e R5.1 nas cultivares BRS 5980IPRO e BRS 7280RR, mas nesta última cultivar, o tratamento com Polímero também foi estatisticamente maior na fase R5.5 (Tabela 4). Houve aumentos na ETR em R3 e R5.5 para todas as cultivares e também em R5.1 para BRS 7280RR (Tabela 4). Em geral, Polímeros superabsorventes são capazes de aumentar a capacidade do solo em reter água (YU, 2017; ABDALLAH, 2019), assim, logo após a irrigação, o tratamento com Polímero, pode portanto, aumentar a disponibilidade e retenção de água no solo, o que por sua vez, favorecerá a manutenção da transpiração, entrada de CO₂ na folha, operações da cadeia de transporte de elétrons fotossintéticos e assim, fixação de carbono via fotossíntese.

A mesma tendência geral ocorreu sob o RH3, houve aumentos de A e E em todas as cultivares na fase R5.5 na presença do Polímero (Tabela 3). Sob esse nível reduzido de irrigação, o Polímero afetou negativamente a g_s com reduções na fase R3 de 25, 14 e 35% e na R5.1 de 37, 12 e 30% para as cultivares BRS 5980IPRO, NA 5909RG e BRS 7280RR, respectivamente (Tabela 3). Este efeito negativo do Polímero não foi detectado na fase R5.5 (Tabela 3). De fato, enquanto a g_s diminuiu de R3 para R5.5 para todas as cultivares no Controle, um indicativo de que a cultura está prosseguindo para o final de seu ciclo, na presença de Polímero a redução na fase R5.5 não ocorreu (Tabela 3). Na soja, o enchimento de grãos ocorre durante a fase R5, período em que as relações fonte-dreno podem ter um impacto significativo na produtividade (BOARD; TAN, 1995). É provável que a produtividade seja maximizada quando a fonte puder atender à demanda dos órgãos de drenagem por fotoassimilados, e fatores de estresse, como a seca, interferem nessa relação e, provavelmente,

reduzem a produtividade (BOARD; KAHN, 2011). Por outro lado, a regulação da perda de água através do fechamento estomático pode auxiliar na manutenção da produtividade quando a cultura está sob estresse hídrico, pois garante um balanço eficiente entre perda de H₂O e incorporação de CO₂ (MASSONNET et al., 2007).

A soja pode iniciar a produção de ácido abscísico após 7 dias de estresse hídrico moderado (LIU et al., 2005) e, quando acumulado na parte aérea, esse hormônio induz uma cascata de sinalizações que incluem respostas como o fechamento estomático e consequente redução nas trocas gasosas, realocação de reservas tais como nutrientes essenciais e fotoassimilados, alterações na arquitetura das plantas e acúmulo de solutos compatíveis (FENTA et al., 2014; ASAFA et al., 2017). Portanto, embora 35% a menos de água tenha sido aplicada em RH3 em comparação com RH4, a adição do Polímero ao solo parece ter provocado o fechamento estomático parcial nas plantas sob Polímero (Tabela 3) e permitiu a manutenção da hidratação da planta durante o ápice do enchimento de grãos, culminando em maiores taxas fotossintéticas (Figura 6).

A lâmina de água aplicada no RH1 e RH2 foi insuficiente para manter as taxas fotossintéticas e transpiratórias (Tabela 3), se comparado aos RH3 e RH4 (Figura 6), pois grandes reduções foram observadas em estágios de desenvolvimento avançados (R5.1 e R5.5). Sob estas condições, a adição de Polímero geralmente teve um efeito negativo em A , g_s e E (Tabela 3). Por exemplo, sob RH2 nas fases R3 e R5.5, A foi maior nas plantas de Controle em relação às plantas tratadas com Polímero, para as cultivares BRS 5980IPRO e BRS 7280RR; enquanto na fase R5.1, as médias no Controle foram maiores para as três cultivares (Tabela 3). Da mesma forma, para g_s e E , o tratamento Controle apresentou médias estatisticamente superiores para todas as fases do desenvolvimento, com aumentos de 13 a 54% e 13 a 50%,

para g_s e E , respectivamente (Tabela 3). No menor nível de disponibilidade de água (RH1), A , g_s e E foram mais altos no Controle para todas as cultivares somente na fase R5.5 (Tabela 3).

Como qualquer outra cultura, quando em déficit hídrico, a soja direciona seus fotoassimilados e nutrientes das folhas senescentes para o crescimento e desenvolvimento de grãos e folhas fotossinteticamente ativas, produzindo um efeito compensatório contra a seca, para manter as folhas restantes metabolicamente ativas (DONG et al., 2019). Para a maioria das avaliações, a adição de polímero promoveu diminuição na Φ_{FSII} e ETR para todas as cultivares sob Polímero e em todas as fases fenológicas, com exceção da BRS 5980IPRO no RH2 e Φ_{PSII} na fase R5.5 para todas as cultivares de soja.

Influência do regime hídrico e polímero nos parâmetros fisiológicos durante as diferentes fases fenológicas em 2017

O uso de polímero, além de alterar as variáveis fisiológicas dentro de uma fase fenológica, afetou também entre as fases fenológicas, de R3 para R5. (Tabela 3; Tabela 4). A foi afetada pelas diferentes fases fenológicas no tratamento RH4 em plantas de Controle para todos as três cultivares, com uma diminuição na fase R5.5 em comparação às fases anteriores. (Tabela 3; Figura 6). É interessante notar que essa diminuição não foi observada nas plantas tratadas com Polímero, sugerindo que sua presença manteve as taxas fotossintéticas constantes, o que poderia adiar a senescência das folhas que pode ocorrer devido ao déficit hídrico (Figure 3, MALEKIAN et al., 2012; WIJewardana et al., 2019; DONG et al., 2019).

O mesmo padrão de ausência de redução na fase R5.5 na presença do Polímero também foi observado para g_s (Tabela 3). Nas taxas transpiratórias, por outro lado, as respostas ocorreram de maneira diferente, pois E foi maior em R5.5 em comparação às outras fases, tanto para o Controle quanto para o Polímero. Além disso, E foi maior no tratamento com Polímero em

comparação ao Controle durante a própria fase R5.5 (Tabela 3; Figura 6). O possível aumento da quantidade de água retida no solo que estaria disponível para a cultura através da presença do Polímero, possivelmente permitiu que as plantas mantivessem seus estômatos abertos durante os estágios finais do ciclo de crescimento e, portanto, mantendo a transpiração e a fotossíntese (ENGINEER, 2016; SILVA et al., 2017; YU et al., 2017). Vale ressaltar que, apesar das expressivas alterações nas trocas gasosas, não foi observada alteração nos parâmetros de fluorescência entre as fases fenológicas no RH4, tanto para as plantas Controle quanto para as tratadas com Polímero.

Semelhante ao RH4, no RH3 A diminuiu em R5.5 em relação as fases R3 e R5.1 no Controle, enquanto não ocorreram reduções no tratamento com Polímero, sugerindo que o Polímero também auxilia na manutenção da fotossíntese durante as fases finais do enchimento de grãos em condições de estresse hídrico moderado (Figura 6). O tratamento com Polímero proporcionou valores de g_s semelhantes em todas as fases fenológicas e um aumento de E na fase R5.5 em comparação com as outras duas fases, o que não foi observado no Controle (Tabela 3). Os parâmetros de fluorescência também foram pouco afetados pela fase fenológica, com apenas pequenas diminuições na BRS 5980IPRO na fase R5.5, e nenhum efeito do Polímero foi observado (Tabela 4). Durante o crescimento reprodutivo, geralmente há aumento da demanda por fotoassimilados e, portanto, aumento da sensibilidade das culturas à seca, o que geralmente leva à diminuição da produtividade como consequência da redução da assimilação de CO_2 (Figuras 7a, 7b e 7c; LIU et al., 2005; BOARD; KAHN, 2011; RAVEN, 2013; ALLEN et al., 2018). A presença do Polímero pôde aliviar os impactos nocivos da seca em condições em que a demanda das plantas excedeu a disponibilidade de água no solo e o suprimento adequado de água parece ter facilitado a manutenção da fotossíntese e da transpiração e, portanto, conduzido ao aumento da produtividade.

Nos RH1 e RH2, a presença do Polímero não reduziu o impacto da seca nas fases fenológicas para os parâmetros das trocas gasosas (Figura 6). De fato, em todas as três cultivares, A , g_s e E tenderam a diminuir em maior extensão de R3 para R5.5 em plantas tratadas com Polímero, em comparação com o Controle. Apesar dessas mudanças nas trocas gasosas, não foram detectadas diferenças significativas em Φ FSII e ETR entre as fases fenológicas sob RH1 ou RH2 (Tabela 4). As taxas fotossintéticas e transpiratórias geralmente diminuem à medida que a cultura chega ao fim de seu ciclo; no entanto, é possível que a água absorvida pelo Polímero nem sempre seja disponibilizada para as raízes das plantas de soja, sob estresse severo. Isso parece ter ocorrido sob RH1 e RH2, pois a presença do Polímero acentuou a redução de g_s em duas das cultivares (BRS 5980IPRO e NA 5909RG), enquanto a cultivar BRS 7280RR não foi afetado (Tabela 3) e tais reduções foram ao menos, parcialmente responsáveis pelos impactos negativos no metabolismo fotossintético.

O impacto do tratamento com Polímero na produtividade da soja nos anos de 2016 e 2017

No ano de 2016 não foi observada diferença estatística entre os tratamentos Controle e Polímero no rendimento de grãos, seu efeito na indução da regulação estomática foi negativo e culminou em reduções em A . No geral, em 2017, a presença de Polímero no solo alterou as variáveis fisiológicas de diferentes maneiras e em diferentes extensões, dependendo do RH. É importante ressaltar que os aumentos nas variáveis fotossintéticas na presença do Polímero sob RH3 e RH4 e a capacidade do tratamento com Polímero em manter os parâmetros fisiológicos durante o desenvolvimento da planta também foram associados ao aumento da produtividade com incrementos de até 40% que pode estar associado à maior disponibilidade de água no solo (Figura 5). A adição de Polímero promoveu aumentos de 39, 20 e 37% no RH3 42, 42 e 40% no RH4 para as cultivares BRS 5980IPRO, NA 5909RG e BRS 7280RR, respectivamente, no

ano de 2017, sugerindo que a manutenção da fotossíntese ao longo do ciclo reprodutivo pode aumentar a produtividade em condições de campo.

É interessante notar que, enquanto no tratamento com Polímero nos RH1 e RH2 houve redução das variáveis fisiológicas, a Produtividade, não foi afetada pelo fornecimento ou não de Polímero (Figura 5). Restrições no suprimento de água que ocorrem durante o período reprodutivo da cultura podem retardar a expansão do ovário e, eventualmente impactar a produtividade, devido à redução do suprimento de fotoassimilados (BALL et al., 2000; JALEEL et al., 2009; JUNIOR et al., 2015). Reduções na assimilação líquida de CO₂ que ocorrem quando a cultura está sob severo déficit hídrico também podem ser resultado do efeito cumulativo do déficit hídrico, resultado de danos foto-oxidativos às proteínas relacionadas à fotossíntese (Tabela 4; MENEZES-SILVA et al., 2017; ZADRAŽNIK et al., 2019). Embora vários estudos tenham relatado um impacto positivo de Polímeros na retenção de água (YU et al., 2017), poucos estudos demonstram seu comportamento em condições de campo. O efeito positivo ou negativo da adição de polímeros na retenção de água dependerá das propriedades físico-químicas do solo e da severidade do déficit hídrico (ABEDI-KOUPAI et al., 2008). No entanto, a fertilização frequente com polímeros tem sido sugerida como uma prática importante para a manutenção de níveis adequados de água no solo, de modo que, em situações de seca por curto período ou mais intensa, os processos fisiológicos permaneçam funcionais (ABEDI-KOUPAI et al., 2008). Isso está de acordo com os resultados obtidos no presente trabalho; a adição de polímero foi benéfica sob RH3, tanto em termos de parâmetros fisiológicos quanto na produtividade da soja, enquanto que reduções de 55% (RH2) e 70% (RH1) em relação à quantidade ideal de água aplicada (RH4) não afetou a produtividade, todavia, os parâmetros fisiológicos tendem a reduzir na presença de Polímero em tais condições.

O suprimento de Polímero em cultivos perenes funciona como um mecanismo preventivo, a água retida na matriz do Polímero pode garantir que estas suportem um maior período de seca e ainda, preserva as trocas gasosas durante a instalação da cultura no campo. Mas em um outro cenário, como em cultivos anuais, o efeito do suprimento do polímero pode depender de sucessivas adubações e mesmo que seus efeitos durem até 5 anos no solo, resultados satisfatórios podem estar atrelados à suplementação anual e portanto, a um possível efeito residual. Os dados sugerem que o Polímero pode ser usado para maximizar os impactos positivos da irrigação, aumentar o turno de rega e em cultivos compreendidos nos períodos chuvosos, o Polímero pode postergar os efeitos deletérios da seca, pois a água estocada em sua matriz pode ser uma valiosa reserva para que a cultura suporte o tempo necessário até novas chuvas (ABEDI- KOUPAI et al., 2008). Ainda, como o cultivo não irrigado da soja no Brasil é comum, esta cultura pode estar sujeita a períodos de seca durante seu ciclo de crescimento (NUNES-NESI et al., 2013; CUI et al., 2019) e em situação de déficit hídrico moderado semelhante ao RH3, a aplicação de Polímero pode ser extremamente vantajosa. Como em condições de seca severa, o uso de Polímero não proporcionou aumentos nos parâmetros fotossintéticos nem no rendimento, é provável que seu uso seja mais benéfico sob condições de estresse hídrico moderado.

2.4. CONCLUSÕES

A adição de Polímero ao solo pode levar a aumentos na fotossíntese e na transpiração e sua manutenção nas diferentes fases fenológicas. Além disso, esses aumentos nos parâmetros fisiológicos se traduzem em aumento do rendimento em condições de campo, pelo menos sob estresse moderado. Os impactos positivos são, no entanto, aparentes principalmente sob irrigação padrão, condições moderadas de seca e ainda, durante duas safras de adubação, sendo

possível um efeito residual. Sob seca severa, representada aqui pelos RH1 e RH2, o Polímero pode afetar negativamente esses parâmetros, mas ressalta-se essas alterações não levam a reduções no rendimento.

2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLAH, A.M. The effect of hydrogel particle size on water retention properties and availability under water stress. **International soil and water conservation research**, v.7, p.275-285, 2019.

ABEDI-KOUPAI, J.; SOHRAB, F.; SWARBRICK, G. Evaluation of hydrogel application on soil water retention characteristics. **Journal of Plant Nutrition**, v.31, p.318-331, 2008.

ALLEN JR., L.H., ZHANG, L.; BOOTE, K.J.; HAUSER, B.A. Elevated temperature intensity, timing, and duration of exposure affect soybean internode elongation, mainstem node number, and pod number per plant. **The Crop Journal**, v.6, p.148-161, 2018.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, p.711–728, 2013.

ASAFA, S.; KHAN, A.L.; KHAN, M.A.; IMRANA, Q.M.; YUNA, B.W.; LEE, I.J. Osmoprotective functions conferred to soybean plants via inoculation with *Sphingomonas* sp. LK11 and exogenous trehalose. **Microbiological Research**, v.205, p.135-145, 2017.

Baker, N.R. Chlorophyll Fluorescence: A Probe of Photosynthesis In Vivo. **Annual Review of Plant Biology**, v.59, p.89-113, 2008.

BALL, R.A.; PURCELL, L.C.; VORIES, E.D. Short-season soybean yield compensation in response to population and water regime. **Crop Science**, v.40, p.1070-1078, 2000.

BLUM, A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential—are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? **Australian Journal of Agricultural Research**, v.56, p.1159–1168, 2005.

BOARD, J.E.; TAN, Q. 1995. Assimilatory capacity effects on soybean yield components and pod number. **Crop Science**, v.35, p.846-851, 1995.

BODNER, G.; NAKHFOROOSH, A.; KAUL, H.P. Management of crop water under drought: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v.35, p.401-442, 2015.

BRACCINI, A.L.; REIS, M.S.; SEDIYAMA, C.S.; SCAPIM, C.A.; BRACCINI, M.C.L. Avaliação da qualidade fisiológica de sementes de soja, após o processo de hidratação-desidratação e envelhecimento acelerado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p.1053-1066, 1999 (in Portuguese, with abstract in English).

BRODRIBB, T.J. AND SCOTT MCADAM, S.A.M. Evolution of the Stomatal Regulation of Plant Water Content. **Plant Physiology**, v.174, p.639-649, 2017.

CATTELAN, A.J.; DALL´AGNOL, A. The rapid soybean growth in Brazil. **Oilseeds and fats Crops and Lipids**, v.25, p.1-12, 2018.

CUI, Y.; JIANG, S.; JIN, J.; NING, S.; FENG, P. Quantitative assessment of soybean drought loss sensitivity at different growth stages based on S-shaped damage curve. **Agricultural Water Management**, v.213, p.821–832, 2019.

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

EMBRAPA. Programa de Monitoramento da Irrigação. **EMBRAPA**, Brasília, 2011.

ENGINEER, C.B.; HASHIMOTO-SUGIMOTO, M.; NEGI, J.; ISRAELSSON-NORDSTRÖM, M.; AZOULAY-SHEMER, T.; RAPPEL, W.J.; IBA, K.; SCHROEDER, J.

CO₂ sensing and CO₂ regulation of stomatal conductance: advances and open questions.

Trends in Plant Science, v.21, p.16-30, 2016.

FELIPPE, D.; NAVROSKI, M.C.; SAMPIETRO, J.A.; FRIGOTTO, T.; ALBUQUERQUE, J.A.; MOTA, C.S.; PEREIRA, M.O. Efeito do hidrogel no crescimento de mudas de *Eucalyptus benthamii* submetidas a diferentes frequências de irrigação. **Floresta**, v.46, p.215–225, 2016. (in Portuguese, with abstract in English).

FELLER, U. Drought stress and carbon assimilation in a warming climate: reversible and irreversible impacts. **Journal of Plant Physiology**, v.203, p.84-94, 2016.

FENTA, B.A.; BEEBE, S.E.; KUNERT, K.J.; BURRIDGE, J.D.; BARLOW, K.M.; LYNCH, J.P.; FOYER, C.H. Field Phenotyping of Soybean Roots for Drought Stress Tolerance. **Agronomy**, v.4, p.418-435, 2014.

HANKS, R.J.; KELLER, J.; RASMUSSEN, V.P.; WILSON, G.D. Line source sprinkler for continuous variable irrigation-crop production studies. **Soil Science Society of America**, v.40, p.426-429, 1976.

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 and Biology**, v.11, p.100-105, 2009.

JAMNICKÁ, G.; DITMAROVÁ, Ľ.; KURJAK, D.; KMEŤ, J.; PŠIDOVÁ, E.; MACKOVÁ, M.; GÖMÖRY, D.; STŘELCOVÁ, K. The soil hydrogel improved photosynthetic performance of beech seedlings treated under drought. **Plant Soil Environment**, v.59, p.446–451, 2013.

JUNIOR, C.P.; KAWAKAMI, J.; BRIDI, M.; MÜLLER, M.M.L.; CONTE, M.V.D.; MICHALOVICZ, L. Phenological and quantitative plant development changes in soybean

cultivars caused by sowing date and their relation to yield. **African Journal of Agricultural Research**, v.10, p.515-523, 2015.

LIU, F.; ANDERSEN, M.N.; JACOBSEN, S.E.; JENSEN, C.R. Stomatal control and water use efficiency of soybean (*Glycine max* L. Merr.) during progressive soil drying. **Environmental and Experimental Botany**, v.54, p.33-40, 2005.

MALEKIAN, A.; VALIZADEH, E.; DASTOORI, M.; SAMADI, S.; BAYAT, V. Soil water retention and maize (*Zea mays* L.) growth as effected by different amounts of Pumice. **Australian Journal of Plant Science**, v.6, p.450-454, 2012.

MASSONNET, C.; COSTES, E.; RAMBAL, S.; DREYER, E.; REGNARD, J.L. Stomatal regulation of photosynthesis in apple leaves: Evidence for different water-use strategies between two cultivars. **Annals of Botany**, v.100, p.1347–1356, 2007.

MENEZES-SILVA, P.E.; SANGLARD, L.M.V.P.; ÁVILA, R.T.; MORAIS, L.E.; MARTINS, S.L.C.V.; NOBRES, P.; PATREZE, C.M.; FERREIRA, M.; ARAÚJO, W.L.; FERNIE, A.R.; DAMATTA, F.M. Photosynthetic and metabolic acclimation to repeated drought events play key roles in drought tolerance in coffee. *Journal of Experimental Botany* 68: 4309-4322.

Mikkelsen, R. 1994. Using hydrophilic polymers to control nutriente release. **Fertilizer Research**, v.38, p.53-59, 2017.

MULLER, B.; PANTIN, F.; GÉNARD, M.; TURC, O.; FREIXES, S.; PIQUES, M.; GIBON, Y. Water deficits uncouple growth from photosynthesis, increase C content, and modify the relationships between C and growth in sink organs. **Journal of Experimental Botany**, v.62, p.1715–1729, 2011.

NIINEMETS, Ü.; GARCÍA-PLAZAOLA, J.I.; TOSENS, T. Photosynthesis during leaf development and ageing. In: FLEXAS, J.; LORETO, F.; MEDRANO, H., eds. **Terrestrial**

Photosynthesis in a Changing Environment: A Molecular, Physiological and Ecological Approach. Cambridge University Press, Palma de Mallorca, PM, SPAN, p.353-372, 2012.

NUNES-NESI, A.; ARAÚJO, W.L.; OBATA, T.; FERNIE, A. Regulation of the mitochondrial tricarboxylic acid cycle. **Current Opinion in Plant Biology**, v.16, p.335-343, 2013.

OLIVEIRA, G.L.P. The geopolitics of Brazilian soybeans. **The Journal of Peasant Studies**, v.46, p.348-372, 2016.

PACHECO, L.P.; MIGUEL, A.S.D.C.S.; SILVA, R.G.; SOUZA, E.D.; PETTER, F.A.; KAPPES, C. Biomass yield in production systems of soybean sown in succession to annual crops and cover crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 52, 582-591, 2017. (in Portuguese, with abstract in English).

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

RAVEN, J.A. Rubisco: still the most abundant protein of Earth? **New Phytologist**, 198, p.1–3, 2013.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; DOS ANJOS, L. H. C.; DE OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R., ALMEIDA, J.A DE; FILHO, J.C.A.; OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T. J. F. (2018). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SARTO, M.V.M.; SARTO, J.R.W.; RAMPIM, L.; ROSSET, J.S.; BASSEGIO, D.; COSTA, P.F.; INAGAKI, A.M. Wheat phenology and yield under drought: A review. **Australian Journal of Crop Science**, v.11, p.941-946, 2017.

TAKAGI, D.; IHARA, H.; TAKUMI, S.; MIYAKE, C. Growth Light Environment Changes the Sensitivity of Photosystem I Photoinhibition Depending on Common Wheat Cultivars.

Frontiers in Plant Science, v.10, p.1-19, 2019.

YU, J.Y.; SHI, J.G.; MA, X.; DANG, P.F.; YAN, Y.L.; MAMEDOV, A.I.; SHAINBERG, I.; LEVY, G.J. Superabsorbent Polymer Properties and Concentration Effects on Water Retention under drying conditions. **Soil and Water Management and Conservation**, v.81, p.889-901,

2017.

YANG, X.; CHEN, X.; GE, Q.; LI, B.; YIPING TONG, Y.; ZHANG, A.; LI, Z.; KUANG, T.; LU, C. Tolerance of photosynthesis to photoinhibition, high temperature and drought stress in flag leaves of wheat: A comparison between a hybridization line and its parents grown under field conditions. **Plant Science**, v.171, p.389-397, 2006.

ZADRAŽNIK, T.; MOEN, A.; ŠUŠTAR-VOZLIČ, J. Chloroplast proteins involved in drought stress response in selected cultivars of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Biotechnology**, v.9, 331-346, 2019.

Tabela 1. Análise do solo na área experimental nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.

Profundidade (cm)	Al ⁻ (cmolc dm ⁻³)	Ca ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	H+Al – (cmolc dm ⁻³)	K (cmolc dm ⁻³)	M.O. (g dm ⁻³)	Mg (cmolc dm ⁻³)	pH (H ₂ O)	P (mg/dm ³)	CTC(Total)	CTC (efetiva)	SB	V%
0-20	0,069	2,317	5,461	0,301	22,5	1,146	5,74	9,868	9,225	3,834	3,765	40,807
20-40	0,089	1,51	4,669	0,135	18,3	0,931	5,62	2,725	7,246	2,666	2,577	35,561

Tabela 2. Assimilação Líquida de CO₂ (A) (μmol CO₂ m⁻²s⁻¹), Condutância Estomática (g_s) (mol H₂O m⁻²s⁻¹), Transpiração (E) (mmol H₂O m⁻²s⁻¹), Rendimento Quântico Máximo do Fotossistema II (FSII) (F_v/F_m) e Rendimento Quântico Efetivo do FSII (F_v'/F_m') de três cultivares de soja, com e sem adição de polímero ao solo no ano de 2016.

Variáveis	Sistema	BRS 5980IPRO				NA 5909RG				BRS 7280RR			
		RH1	RH2	RH3	RH4	RH1	RH2	RH3	RH4	RH1	RH2	RH3	RH4
A	Controle	2,09 Ad	4,99 Ac	15,10 Ab	18,52 Aa	2,89 Ac	6,90 Ac	16,83 Ab	19,10 Aa	3,57 Ac	6,68 Ac	17,87 Ab	21,26 Aa
	Polímero	3,2 Ad	5,64 Ac	9,09 Bb	15,65 Aa	3,87 Ac	4,52 Ac	10,65 Bb	17,52 Aa	3,05 Ac	4,53 Bc	8,58 Bb	17,96 Ba
g _s	Controle	0,114 Ab	0,119 Ab	0,243 Ab	0,366 Aa	0,059 Ac	0,119 Ac	0,251 Ab	0,340 Aa	0,069 Ad	0,085 Ac	0,201 Ab	0,341 Aa
	Polímero	0,043 Bb	0,069 Bb	0,082 Bb	0,196 Ba	0,037 Bc	0,052 Bc	0,123 Bb	0,239 Ba	0,050 Bd	0,054 Bc	0,085 Bb	0,238 Ba
E	Controle	2,72 Ac	2,84 Abc	5,16 Ab	6,82 Aa	1,82 Ac	2,93 Ac	5,54 Ab	6,61 Aa	2,04 Ac	2,4 Ac	4,86 Ab	6,86 Aa
	Polímero	1,23 Bc	1,88 Bbc	2,13 Bb	4,21 Ba	1,16 Bc	1,58 Bc	3,07 Bb	5,05 Ba	1,55 Bc	1,65 Bc	2,34 Bb	5,24 Ba
F _v /F _m	Controle	0,71 Bb	0,73 Bab	0,81 Aa	0,79 Aa	0,73 Ab	0,77 Aa	0,80 Aa	0,79 Aa	0,75 Ab	0,80 Aab	0,82 Aa	0,80 Aa
	Polímero	0,76 Ab	0,80 Aab	0,81 Aa	0,79 Aa	0,74 Ab	0,80 Aa	0,81 Aa	0,81 Aa	0,76 Ab	0,79 Aab	0,82 Aa	0,82 Aa
F _v '/F _m '	Controle	0,44 Ab	0,45 Ab	0,53 Ba	0,52 Aa	0,42 Ab	0,45 Aab	0,44 Bab	0,54 Aa	0,29 Ab	0,45 Aab	0,47 Ba	0,52 Aa
	Polímero	0,46 Ab	0,49 Ab	0,57 Aa	0,57 Aa	0,44 Ab	0,47 Aab	0,53 Aab	0,55 Ba	0,41 Ab	0,44 Aab	0,53 Aa	0,53 Aa

Letras maiúsculas nas colunas comparam os tratamentos Controle e Polímero dentro de cada RH e minúscula nas linhas comparam o RH dentro de cada tratamento Controle e Polímero, médias seguidas pela mesma não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 3. Fotossíntese (*A*) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Condutância Estomática (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e Transpiração (*E*) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) em três estágios fenológicos de cultivares de soja para tratamentos Controle e Polímero.

		RH4								
		<i>A</i>			g_s			<i>E</i>		
		R3	R5.1	R5.5	R3	R5.1	R5.5	R3	R5.1	R5.5
BRS	Controle	18.68Aa	17.97Aa	15.64Bb	0.34Aa	0.27Aa	0.26Ab	6.97Ab	6.12Ab	8.58Ba
5980IPRO	Polímero	18.73Aa	19.58Aa	18.63Aa	0.30Aa	0.25Aa	0.30Aa	6.99Ab	6.18Ab	9.58Aa
NA	Controle	20.71Aa	18.56Aa	12.65Bb	0.30Aa	0.28Aa	0.19Ab	6.89Ab	6.77Ab	7.46Ba
5909RG	Polímero	16.88Aa	18.69Aa	18.50Aa	0.23Aa	0.23Aa	0.29Aa	5.91Ab	6.09Ab	10.13Aa
BRS	Controle	18.80Aa	18.18Aa	13.84Bb	0.28Aa	0.27Aa	0.22Ab	6.65Ab	6.69Ab	8.44Ba
7280RR	Polímero	18.20Aa	20.70Aa	17.99Aa	0.27Aa	0.24Aa	0.27Aa	6.88Ab	6.46Ab	9.85Aa
		RH3								
		<i>A</i>			g_s			<i>E</i>		
		R3	R5.1	R5.5	R3	R5.1	R5.5	R3	R5.1	R5.5
BRS	Controle	19.82Aa	18.35Aa	15.20Bb	0.35Aa	0.35Aa	0.27Ab	7.15Aa	7.26Aa	8.35Ba
5980IPRO	Polímero	19.71Aa	19.22Aa	19.26Aa	0.26Ba	0.22Ba	0.31Aa	6.36Ab	5.65Ab	9.93Aa
NA	Controle	19.92Aa	17.20Aa	11.30Bb	0.29Aa	0.25Aa	0.18Ab	6.63Aa	6.34Aa	7.21Ba
5909RG	Polímero	18.73Aa	18.26Aa	16.35Aa	0.25Ba	0.22Ba	0.23Aa	6.46Ab	6.10Ab	8.94Aa
BRS	Controle	20.64Aa	18.84Aa	14.19Bb	0.31Aa	0.27Aa	0.20Ab	7.37Aa	6.78Aa	8.04Ba
7280RR	Polímero	18.36Aa	18.75Aa	17.02Aa	0.20Ba	0.19Ba	0.25Aa	5.55Ab	5.72Ab	9.44Aa
		RH2								
		<i>A</i>			g_s			<i>E</i>		
		R3	R5.1	R5.5	R3	R5.1	R5.5	R3	R5.1	R5.5
BRS	Controle	19.94Aa	16.14Ab	11.29Ac	0.30Aa	0.24Ab	0.18Ab	6.55Ab	5.70Ac	6.94Aa
5980IPRO	Polímero	15.17Ba	11.50Bb	8.90Bc	0.18Ba	0.12Bb	0.15Bb	5.01Bb	3.55Bc	6.12Ba
NA	Controle	15.64Aa	12.39Ab	8.62Ac	0.20Aa	0.16Ab	0.16Ab	5.17Ab	4.76Ac	6.80Aa
5909RG	Polímero	15.36Aa	8.82Bc	9.93Ab	0.17Ba	0.08Bb	0.14Bb	5.05Bb	2.89Bc	5.93Ba
BRS	Controle	18.07Aa	14.32Ab	14.53Ac	0.22Aa	0.17Ab	0.22Ab	5.87Ab	4.83Ac	8.70Aa
7280RR	Polímero	16.19Ba	13.94Bb	6.85Bc	0.18Ba	0.14Bb	0.10Bb	5.10Bb	4.55Bc	4.36Ba
		RH1								
		<i>A</i>			g_s			<i>E</i>		
		R3	R5.1	R5.5	R3	R5.1	R5.5	R3	R5.1	R5.5
BRS	Controle	16.0Aa	9.12Ab	8.27Ab	0.21Aa	0.11Ab	0.21Aa	4.98Ab	3.42Ac	7.52Aa
5980IPRO	Polímero	12.21Aa	9.65Ab	3.68Bb	0.12Aa	0.10Aab	0.07Bb	3.63Aa	3.33Aa	3.10Ba
NA	Controle	13.18Aa	6.70Ab	6.78Ab	0.14Aa	0.08Ab	0.15Aa	3.99Ab	2.62Ac	6.15Aa
5909RG	Polímero	11.81Aa	9.09Ab	4.44Bb	0.12Aa	0.08Aab	0.07Bb	3.84Aa	2.68Aa	3.39Ba
BRS	Controle	12.98Aa	6.90Ab	10.37Ab	0.14Aa	0.08Ab	0.16Aa	4.14Ab	2.75Ac	6.90Aa
7280RR	Polímero	12.28Aa	12.02Ab	3.63Bb	0.13Aa	0.11Aab	0.07Bb	3.82Aa	4.08Aa	3.26Ba

As letras maiúsculas comparam em cada estágio fenológico os tratamentos Controle e Polímero, enquanto as letras minúsculas comparam dentro de cada Controle e Polímero o estágio fenológico, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 4. Rendimento Quântico Efetivo do Fotossistema II (Φ PSII) e Taxa de Transporte de Elétrons (ETR) em três estágios fenológicos de cultivares de soja e tratamentos de controle e polímero.

		RH4					
		Φ PSII			ETR		
		R3	R5.1	R5.5	R3	R5.1	R5.5
BRS	Controle	0.27Ba	0.27Ba	0.25Aa	144.63Ba	142.56Aa	133.21Ba
5980IPRO	Polímero	0.29Aa	0.29Aa	0.26Aa	152.47Aa	152.47Aa	138.43Aa
NA	Controle	0.29Aa	0.29Aa	0.25Aa	146.82Ba	146.82Aa	134.32Ba
5909RG	Polímero	0.29Aa	0.29Aa	0.30Aa	154.25Aa	154.25Aa	157.72Aa
BRS	Controle	0.27Ba	0.27Ba	0.25Ba	139.50Ba	139.50Ba	129.38Ba
7280RR	Polímero	0.31Aa	0.31Aa	0.30Aa	165.35Aa	165.35Aa	159.65Aa
		RH3					
		Φ PSII			ETR		
		R3	R5.1	R5.5	R3	R5.1	R5.5
BRS	Controle	0.27Aa	0.27Aa	0.22Ab	141.57Aa	141.57Aa	116.96Aa
5980IPRO	Polímero	0.28Aa	0.28Aa	0.24Ab	145.69Aa	145.69Aa	126.89Aa
NA	Controle	0.28Aa	0.28Aa	0.26Aa	148.07Aa	148.07Aa	133.82Ab
5909RG	Polímero	0.30Aa	0.30Aa	0.26Aa	155.25Aa	155.25Aa	137.21Ab
BRS	Controle	0.28Aa	0.28Aa	0.31Aa	148.86Aa	148.86Aa	160.48Aa
7280RR	Polímero	0.30Aa	0.30Aa	0.26Aa	156.70Aa	156.70Aa	137.66Aa
		RH2					
		Φ PSII			ETR		
		R3	R5.1	R5.5	R3	R5.1	R5.5
BRS	Controle	0.21Aa	0.21Aa	0.17Aa	109.24Aa	109.24Aa	90.55 Aa
5980IPRO	Polímero	0.19Aa	0.19Aa	0.17Aa	97.47Ba	97.47Ba	87.30Aa
NA	Controle	0.22Aa	0.22Aa	0.23Aa	117.79Aa	117.79Aa	118.61Aa
5909RG	Polímero	0.20Ba	0.20Ba	0.18Ba	106.26Ba	106.26Ba	92.80Ba
BRS	Controle	0.25Aa	0.25Aa	0.26Aa	129.75Aa	132.58Aa	139.12Aa
7280RR	Polímero	0.24Ba	0.24Ba	0.16Ba	126.58Ba	126.58Ba	85.62Ba
		RH1					
		Φ PSII			ETR		
		R3	R5.1	R5.5	R3	R5.1	R5.5
BRS	Controle	0.12Ba	0.12Ba	0.12Aa	62.18Ba	62.18Ba	61.63Aa
5980IPRO	Polímero	0.16Aa	0.16Aa	0.10Aa	86.11Aa	86.11Aa	51.74Ba
NA	Controle	0.14Ba	0.14Ba	0.15Aa	75.00Ba	75.00Ba	76.96Aa
5909RG	Polímero	0.16Aa	0.16Aa	0.10Aa	84.95Aa	84.95Aa	53.16Ba
BRS	Controle	0.14Ba	0.14Ba	0.18Aa	71.27Ba	71.27Ba	92.46Aa
7280RR	Polímero	0.21Aa	0.21Aa	0.11Aa	109.46Aa	109.46Aa	55.51Ba

As letras maiúsculas comparam em cada estágio fenológico os tratamentos Controle e Polímero, enquanto as letras minúsculas comparam dentro de cada Controle e Polímero o estágio fenológico pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

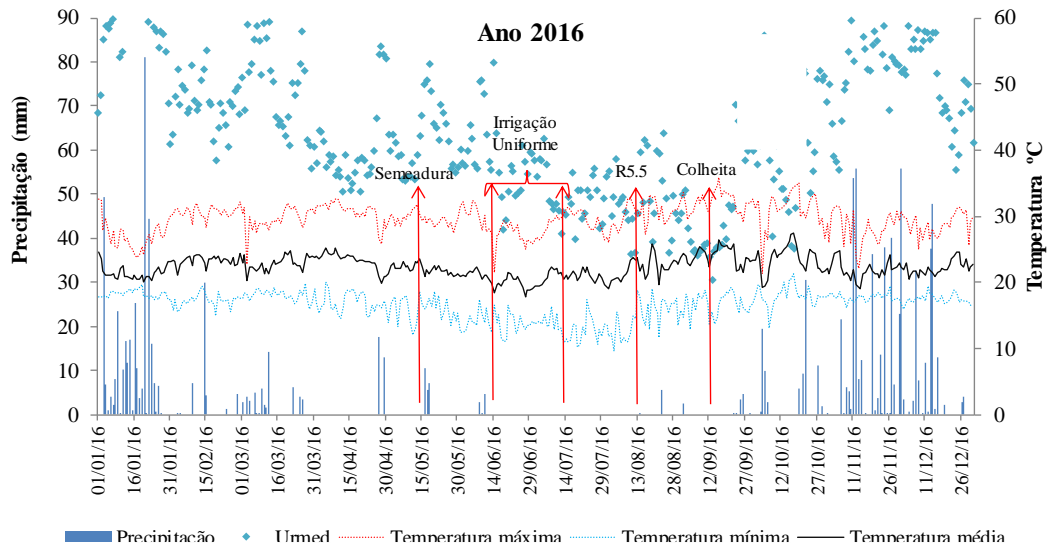


Figura 1. Temperaturas máxima e mínima, precipitação e datas de plantio, avaliação e colheita de plantas de soja no ano de 2016.

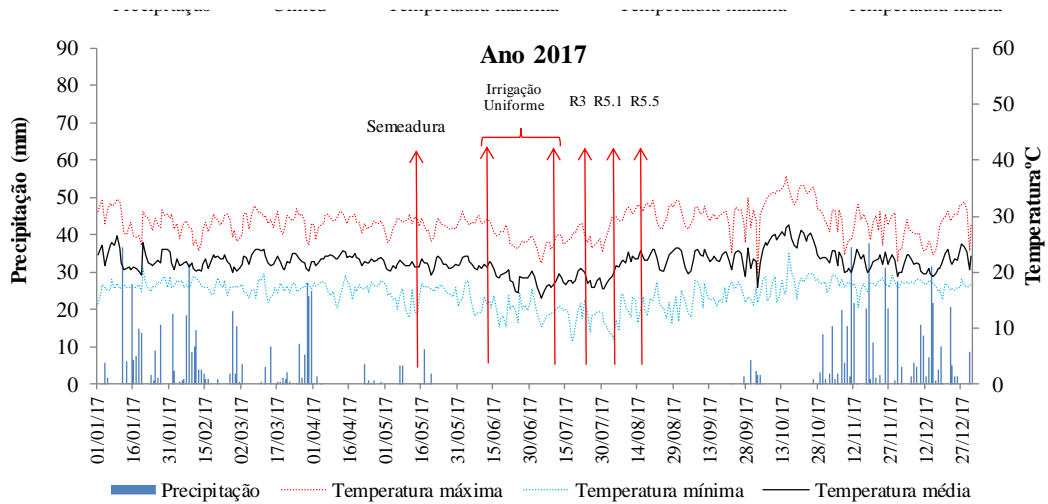


Figura 2. Temperaturas máxima e mínima, precipitação e datas de plantio, avaliação e colheita de plantas de soja no ano de 2017.

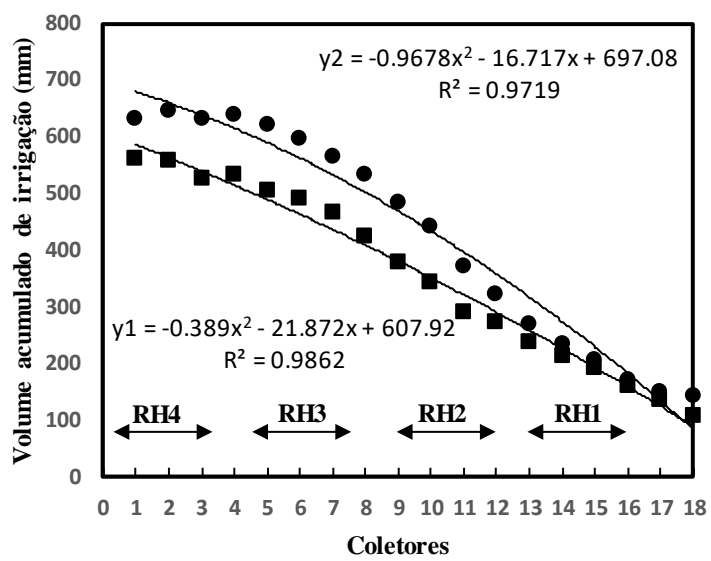


Figura 3. Volume acumulado de irrigação aplicado na cultura da soja durante a estação seca em 2016.

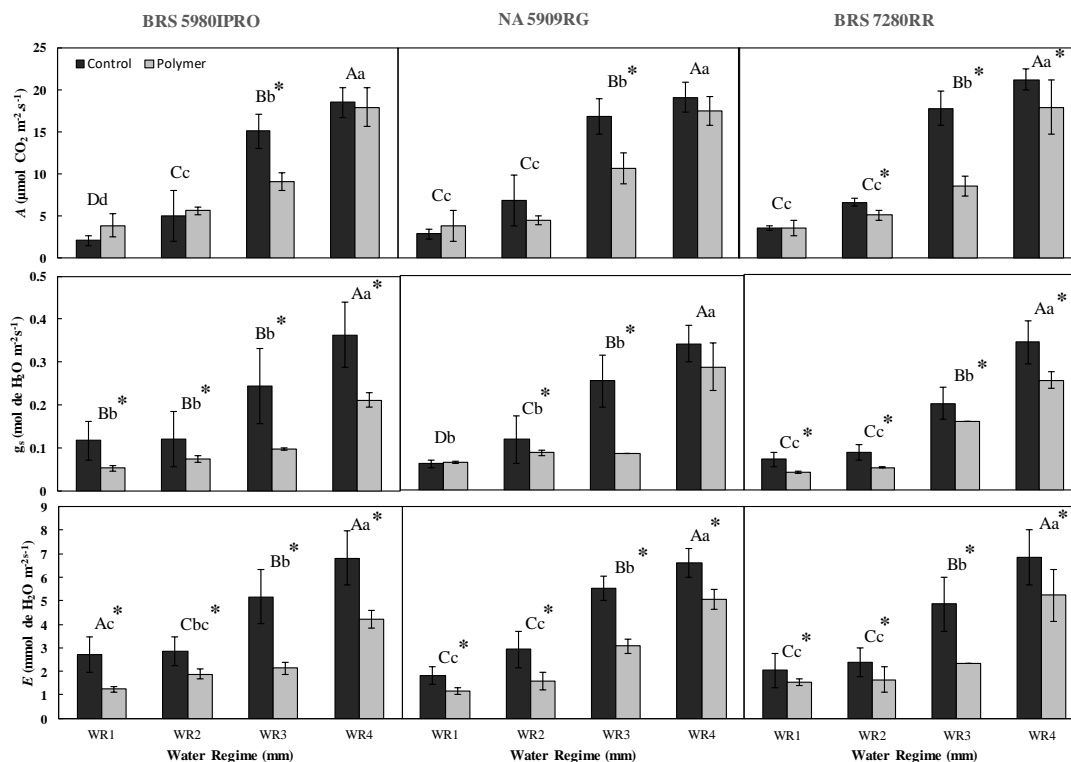


Figura 4. Fotossíntese (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Condutância Estomática (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e Transpiração (E) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) em três cultivares de soja submetidas a quatro regimes de água (RH) para três cultivares (BRS 5980IPRO, NA 5909RG e BRS 7280RR) em soja com e sem suprimento de polímeros (RH 167 mm, RH 237 mm, RH 341 mm, RH 534 mm). Letras maiúsculas indicam diferenças entre o RH para controle e letras minúsculas indicam diferenças entre o RH para polímero e "*" indica diferenças significativas entre os tratamentos com e sem suprimento de polímero pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

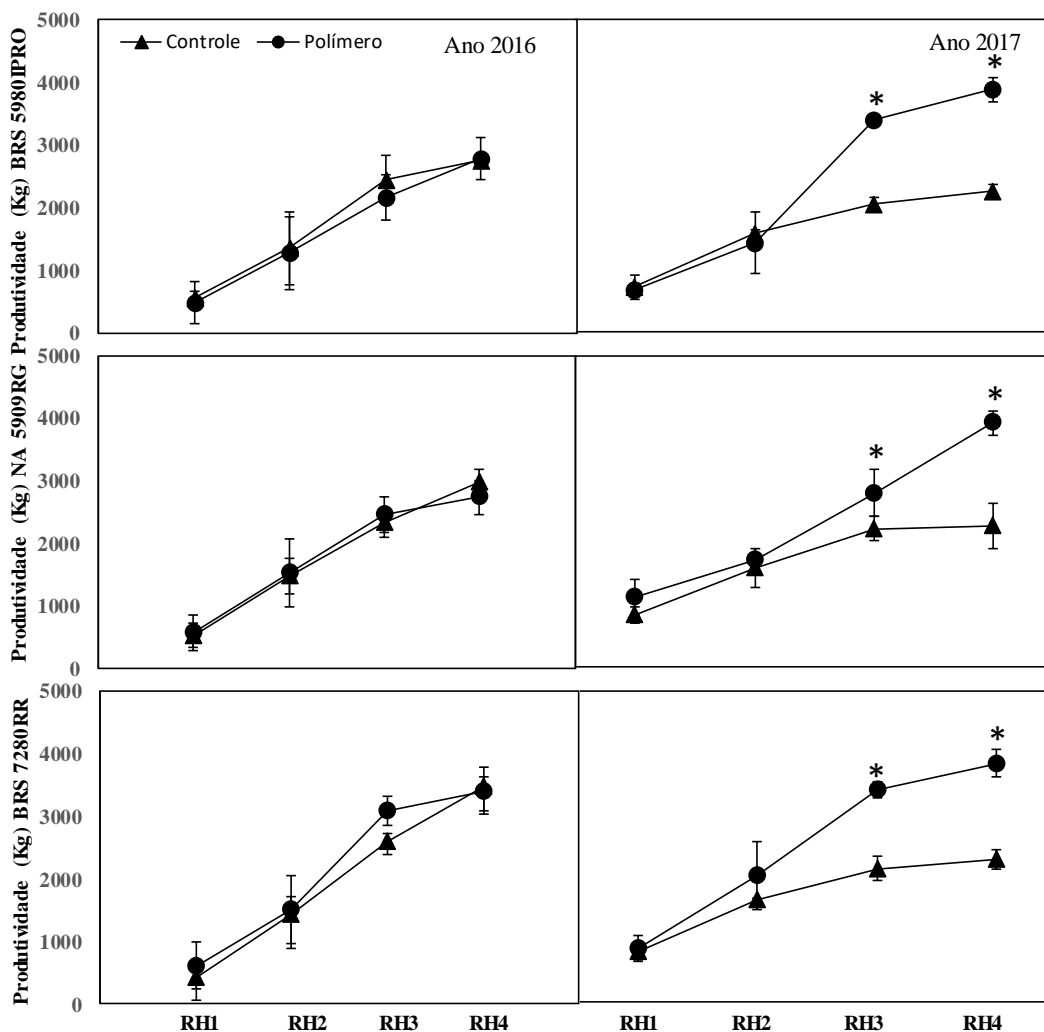


Figura 5. Produtividade (Kg ha^{-1}) em três cultivares de soja submetidas a quatro regimes de água RH). Controle (triângulos) e polímero tratado (círculos) para os anos de 2016 e 2017. “*” indica diferenças significativas entre as plantas tratadas com controle e polímero pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). (RH1 - 167 mm, RH2 - 237 mm, RH3 - 341 mm, RH4 - 534 mm).

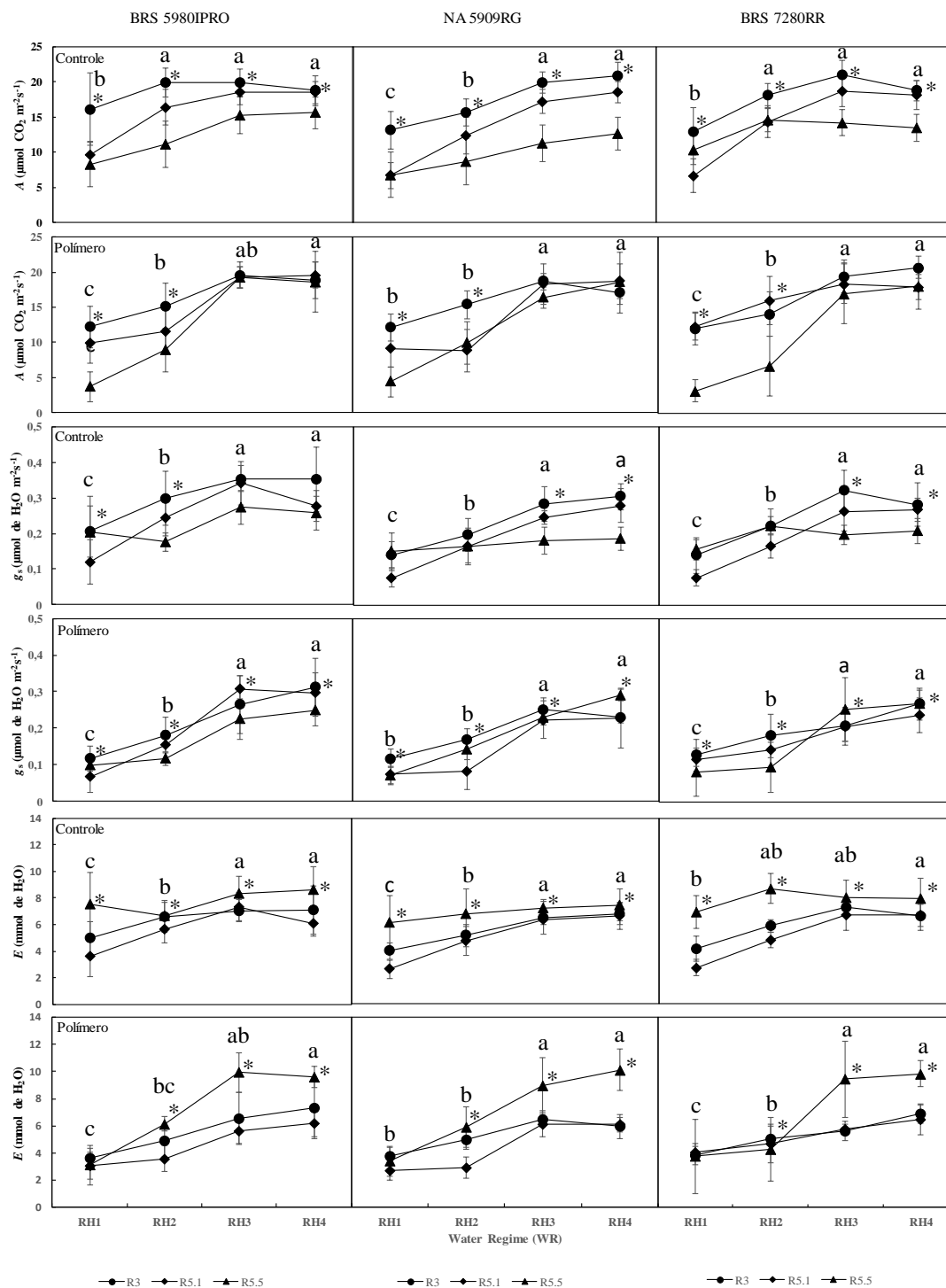


Figura 6. Fotossíntese (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Condutância Estomática (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e Transpiração (E) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) em três cultivares de soja submetidas a quatro regimes hídricos (RH) em três estágios fenológicos do desenvolvimento da soja com e sem suprimento de polímeros (RH1 - 167 mm, RH2 - 237 mm, RH3 - 341 mm, RH4 - 534 mm). Letras minúsculas indicam diferenças entre a RH para cada genótipo e * indica diferenças significativas entre as fases fenológicas dentro de cada RH pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

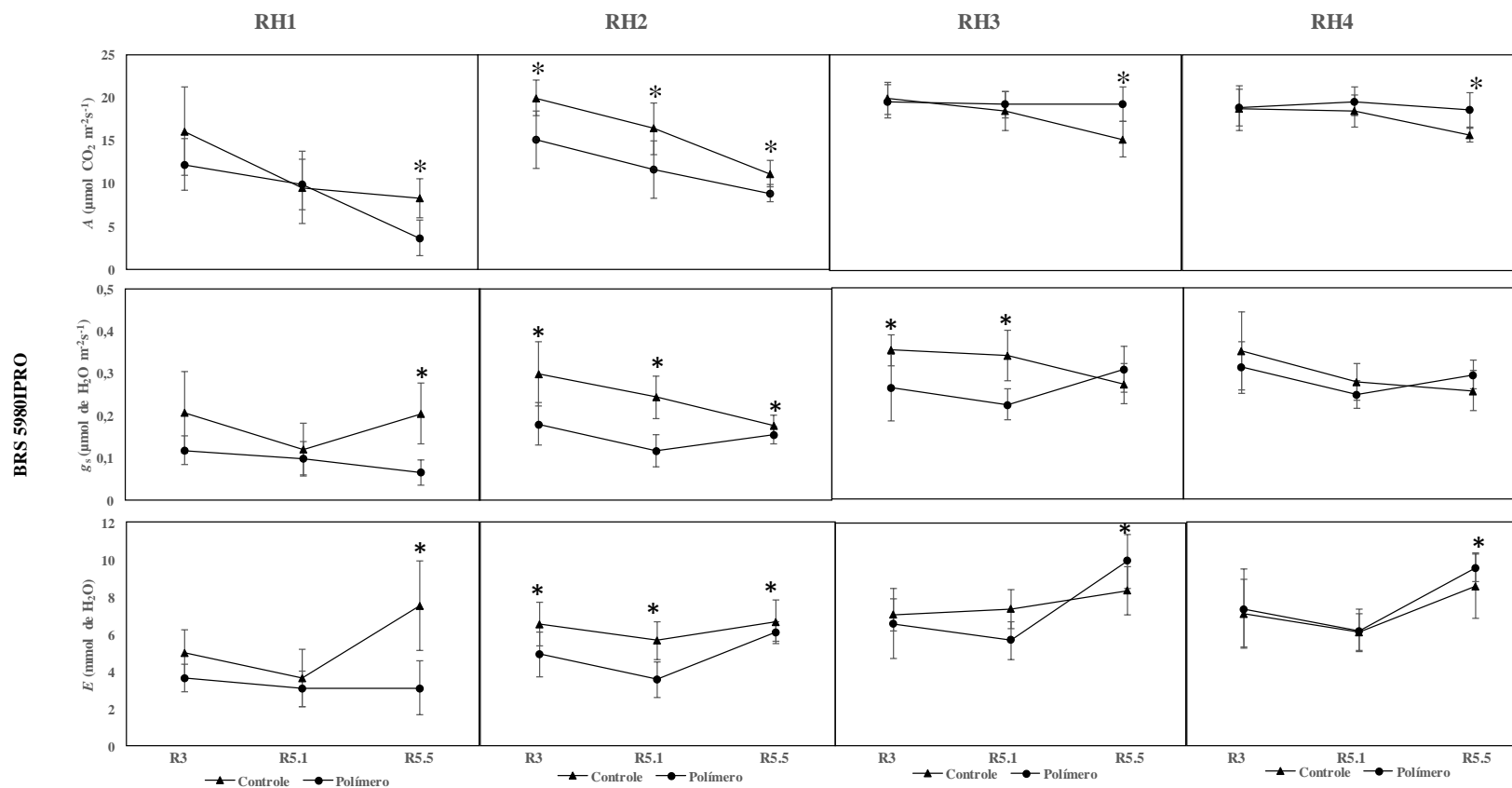


Figura 7a. Fotossíntese (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Condutância Estomática (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e Transpiração (E) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) sob quatro regimes hídricos (RH) em três estágios fenológicos da soja com e sem suprimento de polímeros (RH1 - 167 mm, RH2 - 237 mm, RH3 - 341 mm, RH4 - 534 mm) para a cultivar BRS 5980IPRO. “*” indica diferenças significativas entre os tratamentos controle e polímero dentro de cada RH e fase fenológica pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

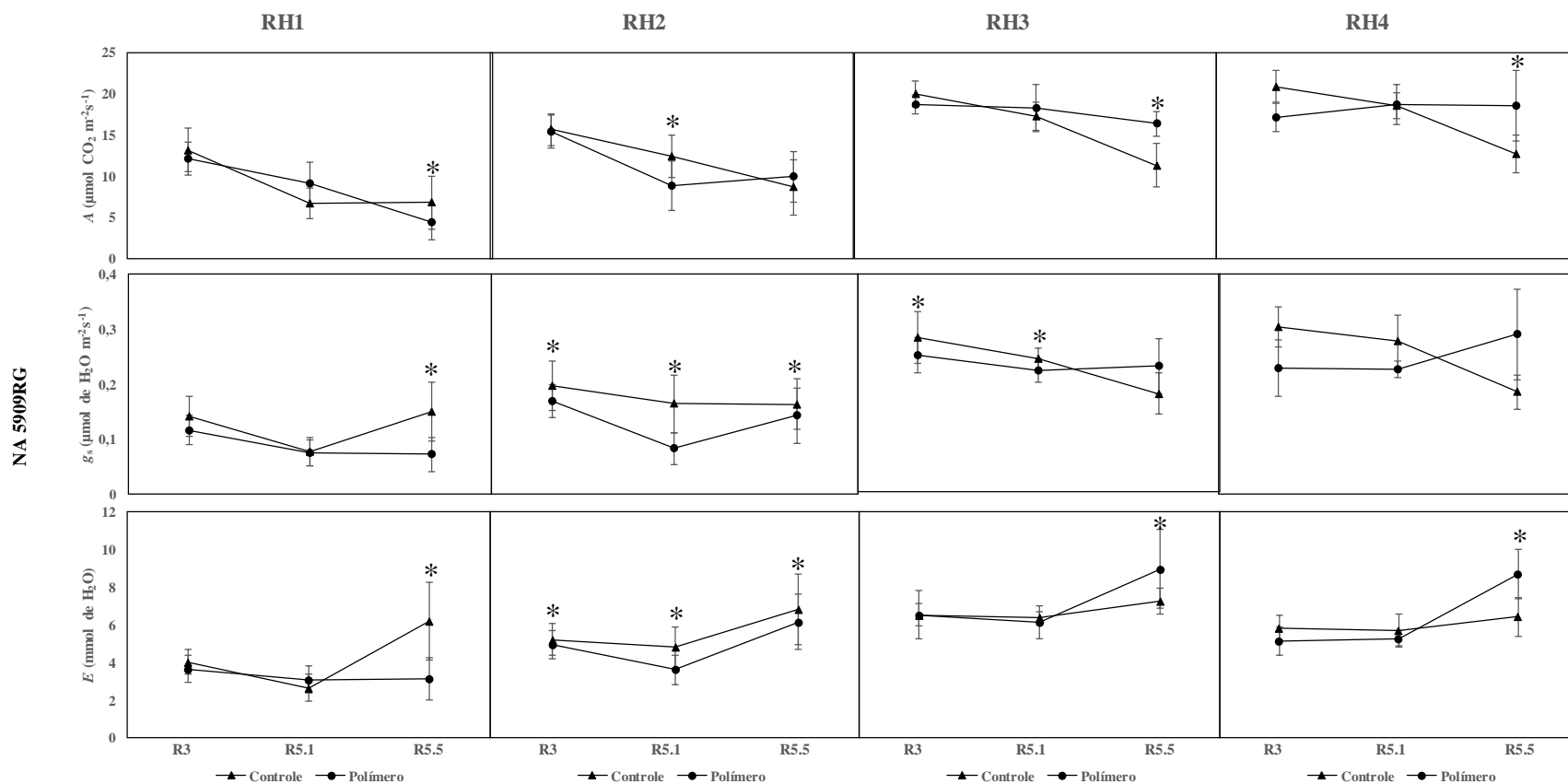


Figura 7b. Fotossíntese (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Condutância Estomática (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e Transpiração (E) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) sob quatro regimes hídricos (HR) em três estágios fenológicos da soja com e sem suprimento de polímeros (RH1 - 167 mm, RH2 - 237 mm, RH3 - 341 mm, RH4 - 534 mm) para a cultivar NA 5909RG. “*” indica diferenças significativas entre os tratamentos controle e polímero dentro de cada WR e fase fenológica pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

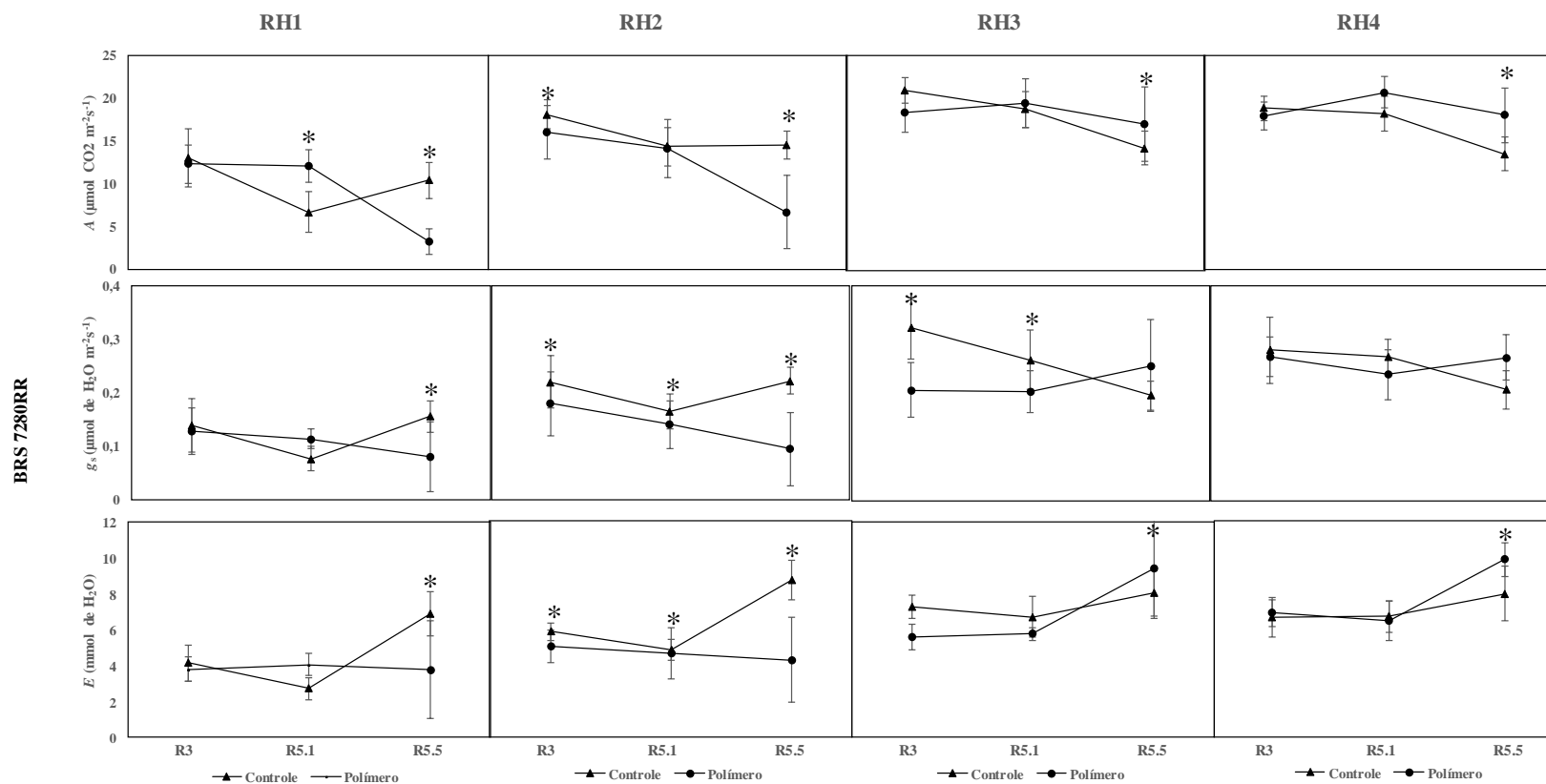


Figura 7c. Fotossíntese (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Condutância Estomática (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e Transpiração (E) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) sob quatro regimes hídricos (RH) em três estágios fenológicos da soja com e sem suprimento de polímeros (RH1 - 167 mm, RH2 - 237 mm, RH3 - 341 mm, RH4 - 534 mm) para a cultivar BRS 7280RR. “*” indica diferenças significativas entre os tratamentos controle e polímero dentro de cada RH e fase fenológica pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

**CAPÍTULO 3. ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS DE SOJA CULTIVADA COM
REMINERALIZADOR DO SOLO NO CERRADO SOB REGIMES VARIÁVEIS DE
ÁGUA**

ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS DE SOJA CULTIVADA COM REMINERALIZADOR DO SOLO NO CERRADO SOB REGIMES VARIÁVEIS DE ÁGUA

RESUMO - Na região do Cerrado, ocorrem períodos de seca durante a estação chuvosa, de modo que é importante o estudo de técnicas para mitigar seus impactos. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do remineralizador do solo Mica xisto na fisiologia, produtividade e qualidade dos grãos de soja sob diferentes regimes hídricos (RH). O experimento foi conduzido em condições de campo por dois anos, utilizando-se um gradiente de água e três tratamentos: Mica xisto (FMX), adubação convencional e controle. Em 2017 e 2018, foi avaliada a influência dos tratamentos na soja. A fotossíntese, condutância estomática, transpiração, concentração interna de CO₂, rendimento quântico efetivo do fotossistema II (FSII) (F_v'/F_m'), rendimento quântico do FSII (Φ FSII) e taxa de transporte de elétrons reduziram em função do avanço da fase fenológica e redução da quantidade de água. A qualidade dos grãos foi afetada apenas pelo RH. O Mica xisto foi estatisticamente semelhante aos tratamentos com fertilização convencional e controle em 2017 e 2018. O rendimento decresceu devido à antecipação da idade fenológica e do RH, mas não houve diferenças entre os tratamentos com Mica xisto, fertilização convencional e controle em 2017 e 2018. A redução do rendimento é atribuída ao fechamento estomático, perda da capacidade fotoprotetora e danos à maquinaria fotossintética causados pela seca.

Termos para indexação: Mica xisto, estresse hídrico, fotossíntese, line source, *Glycine max*.

PHYSIOLOGICAL CHANGES IN SOYBEAN CULTIVATED WITH SOIL REMINERALIZER IN THE CERRADO UNDER VARIABLE WATER REGIMES

ABSTRACT - In the Cerrado region, dry spells occur during the rainy season, so that it is important to study techniques for mitigating their impacts. The objective of this study was to evaluate the influence of soil remineralizer Mica schist on soybean physiology, productivity and grain quality under different water regimes. The experiment was conducted under field conditions for two years, using a water gradient and three treatments: mica schist, conventional fertilization and control. In 2017 and 2018, the influence of the treatments on soybean plant was evaluated. The photosynthesis, stomatal conductance, transpiration, internal CO₂ concentration, effective quantum yield of photosystem II (PSII) (F_v'/F_m'), quantum yield (PSII) (Φ PSII) and electron transport rate reduced as a function of the advanced phenological phase and reduction in water regime. Grain quality were only affected by water regime. The Mica schist was statistically similar to Control and Conventional fertilization in both 2017 and 2018. Yield declined due to the anticipation of phenological age and water regime (WR), but there were no differences between Mica schist, Conventional fertilization and Control treatments in 2017 and 2018. The reduction of yield is attributed to stomatal closure, loss of photoprotective capacity and damage to the photosynthetic machinery caused by drought.

Index terms: Mica schist, water stress, photosynthesis, line source, *Glycine max.*

3.1. INTRODUÇÃO

Em 2018, o Brasil produziu mais de 118 milhões de toneladas de soja (CONAB 2018) e se tornou o maior produtor mundial. No entanto, a expansão da produção de soja para o Centro-Oeste do país trouxe alguns desafios, incluindo a escassez e a concentração de chuvas (CATTELAN; DAL'AGNOL, 2018). Embora esta cultura seja plantada na estação chuvosa, podem ocorrer períodos secos (veranicos) que limitam sua produtividade (BORNHOFEN et al., 2015). A seca limita o crescimento das plantas por meio de reduções na expansão celular, mas também interfere severamente no metabolismo do carbono, com a diminuição da fotossíntese (BAKER, 2008).

As plantas sob déficit hídrico sofrem severas limitações fotossintéticas devido ao fechamento estomático que reduz a entrada de CO₂. Além de reduzir a fixação de carbono, durante a seca, o excesso de energia luminosa que não é usada pelo ciclo de Calvin pode induzir a formação de espécies reativas de oxigênio que, por sua vez, degradam constituintes celulares importantes, como membranas, proteínas e ácidos nucleicos (KAR, 2011; CHOUDHURY et al., 2017). Além disso, a seca também pode influenciar na duração total do ciclo da cultura, encurtando sua fase vegetativa e reprodutiva e, portanto, afetando diretamente a produtividade. Mesmo reduções modestas na disponibilidade de água podem levar a grandes impactos, pois um potencial hídrico no solo de -0,8 MPa pode reduzir a área foliar e a matéria seca da soja em 60 e 65%, respectivamente, reduzindo a produtividade da cultura (BOARD; KAHN, 2011).

Por esses motivos, são necessárias novas práticas agrícolas para reter a água do solo e assim, proporcionar benefícios ao metabolismo das plantas sob condições de estresse hídrico. Entre essas práticas, a literatura demonstra que o uso de pó de rocha promove o desenvolvimento das plantas, aumenta o índice de área foliar e a produtividade do milho (MALEKIAN et al., 2012), e também aumenta o suprimento de nutrientes e a complexação de metais pesados (ZHANG, 2017). As argilas são responsáveis pelo efeito de expansão e retração

nos solos, e quanto maior o teor de argila, maior a capacidade de retenção de água do solo (NOVÁK; HLAVÁCKOVÁ, 2018).

Assim, na presença de água, os solos supridos com os minerais argilosos das rochas podem sofrer alterações em suas propriedades físicas, como densidade, porosidade, condutividade hidráulica e capacidade de retenção de água (WINIWATER; BLUM, 2008). Essas mudanças, por sua vez, podem levar a alterações fisiológicas nas plantas, como as trocas gasosas e a fluorescência da clorofila *a* (BAKER, 2008). A adição de pó de rocha a solos brasileiros tem sido estudada como uma fonte potencial de potássio e outros nutrientes utilizando rochas vulcânicas alcalinas, biotita-flogopitita xisto e rochas alcalinas ultramáficas (THEODORO et al., 2006; RIBEIRO et al., 2010; MARTINS, 2010; SOUZA et al., 2016). No entanto, apenas o impacto na nutrição das plantas foi estudado e o possível efeito condicionante, através da retenção de água por minerais argilosos, permanece pouco estudado. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do remineralizador do solo (FMX) na fisiologia e produtividade da soja sob regimes hídricos (RH) variáveis.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados em sistema de plantio direto, em condições de campo, na Embrapa Cerrados, em Planaltina-DF (15°35'30" S, 47°42'30" W), entre julho a novembro de 2017 e de junho a outubro de 2018. A análise do solo foi realizada na camada de 0-20 cm antes da instalação do experimento em 2017 e no início de 2019, para garantir que a fertilização adequada e a água fossem os únicos fatores limitantes (Tabela 1).

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições em esquema de parcelas subdivididas: a parcela principal foi composta pelos tratamentos 1. Remineralizador do solo (FMX), 2. NPK e 3. Controle, e as subparcelas foram quatro regimes hídricos (RH). O remineralizador do solo (FMX) é um xisto de biotita do Grupo

Neoproterozóico Araxá no estado de Goiás (PIMENTEL, 2016) e a caracterização geoquímica e mineralógica está descrita em Souza (2016 e 2017).

Foi utilizado o cultivar de soja [*Glycine max* (L.) (Merrill)], NA 5909RG, de maturidade super-precoce. Para o tratamento com NPK (0-20-20), a fertilização foi de 80 Kg ha⁻¹ e o FMX foi adicionado à superfície do solo na dose de 5 t ha⁻¹ no primeiro ano. No tratamento controle, nenhuma fertilização foi realizada. Cada parcela avaliada consistiu de duas linhas centrais de 5 m, eliminando 1,0 m de bordadura.

No segundo ano, os tratamentos permaneceram os mesmos e o FMX recebeu fertilização de 10 t ha⁻¹ nas mesmas parcelas. Nos tratamentos FMX e NPK, foi realizada a fertilização de manutenção somente com P (80 Kg ha⁻¹) na forma de superfosfato simples (20% de P₂O₅), uma vez que o conteúdo de K era adequado.

Nos dois anos, as sementes de soja foram inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* (1x10⁹ UFC g⁻¹ inoculante) a 200 g por 50 Kg de sementes. De novembro de 2017 a maio de 2018, o milho foi utilizado como cultura de cobertura, com adubação residual de soja.

A irrigação do experimento foi homogênea por 35 dias após a emergência (DAE) em 2017 e 2018. Após esse período, foi adotada a metodologia de *line source* (HANKS et al., 1976), modificada pela introdução de uma barra de irrigação (OLIVEIRA et al., 2017), utilizando aspersores com fluxo decrescente do meio para a borda da barra, a fim de produzir um gradiente de déficit hídrico. Os regimes hídricos (RH) foram obtidos através da barra de irrigação (IrrigaBrasil modelo 36/42), com 20 m de largura em cada lado, conectada a um TurboMaq 75/GB autopropelido, com velocidade ajustável de acordo com o volume de água a ser aplicado.

O nível mais alto de irrigação a ser aplicado foi determinado de acordo com o Programa de Monitoramento de Irrigação da Embrapa Cerrados. Quatro níveis de irrigação foram delineados ao longo da barra, com comprimentos diferentes a partir da porção inicial do sistema,

representando os quatro RH. Durante a fase de irrigação uniforme (27 de julho a 30 de agosto de 2017 e 8 de junho a 13 de julho de 2018), foram fornecidos aproximadamente 160 mm de água. O volume acumulado durante o ciclo da planta dos aspersores mais externos até o início da barra foi: 160,01 mm (16 m), 274,68 mm (13 m), 420,55 (10 m) e 634,35 mm (4 m) em 2017 e 164,79 mm (16 m), 237,45 mm (13 m), 343,15 mm (10 m) e 531,43 mm (4 m) em 2018. Os números entre parênteses representam a distância de cada RH até o início da barra de irrigação. As irrigações foram realizadas de acordo com a evapotranspiração da cultura e os níveis de água foram denominados RH1, RH2, RH3 e RH4, para os anos de 2017 e 2018, respectivamente.

No experimento realizado em 2017, aos 52, 62 e 76 DAE, as trocas gasosas foliares e a fluorescência da clorofila *a* foram avaliadas nas fases fenológicas R4, R5.1 e R5.5, respectivamente. No experimento realizado em 2018, foram realizadas avaliações aos 63 DAE e foi realizada uma simulação de um veranico com duração de 15 dias. Para este experimento, os níveis de irrigação foram mantidos até a fase R5.1 da cultura e, a partir do 63 DAE, foi iniciado um experimento de 15 dias sem irrigação. Nos 16° e 17° dias, foi realizada irrigação em substituição à água perdida pela evapotranspiração durante os 15 dias de veranico simulado. A análise das trocas gasosas foi realizada nos 1°, 8°, 15° e 17° dias após o início da supressão da irrigação (DASI). A eficiência operacional do fotossistema II (PSII) (F_q'/F_m') foi medida usando a metodologia da fluorescência transiente induzida por luz (LIFT) (PIERUSCHKA, et al., 2014, KELLER et al., 2018) utilizando o instrumento LIFT-REM (SOLIENSE INC., SHOREHAM, NY, EUA) e os índices de vegetação (IV) foram avaliados através de um espectrômetro incluído no mesmo equipamento usado para medir a fluorescência pela metodologia LIFT. Essas avaliações ocorreram durante os 10 dias iniciais do experimento de veranico simulado.

A assimilação líquida de CO₂ (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), condutância estomática (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e taxa de transpiração (E) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) foram avaliadas das 9:00 às 13:00, sob uma irradiância de 1200 μmol de fótons $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e concentração externa de CO₂ (C_a) de 400 $\mu\text{mol mol}^{-1}$. Em 2017, um sistema de troca de gasosas de fluxo aberto portátil (LI-6400XT; LI-COR INC., LINCOLN, NE) foi usado, enquanto em 2018, as mesmas variáveis foram avaliadas usando outro sistema de troca de gasosas de fluxo aberto portátil, o LC-Pro SD (ADC BIOSCIENTIFIC).

Em 2017, as análises de fluorescência da clorofila a foram realizadas com uma câmara de fluorescência acoplada à câmara de assimilação de CO₂ do analisador de gás infravermelho LI-6400XT. Em cada parcela, foram feitas três avaliações das trocas gasosas e da fluorescência da clorofila a , na na folha central do trifólio totalmente expandido usando folhas de soja adaptadas à luz e fisiologicamente maduras.

A eficiência quântica efetiva do fotossistema II (FSII) (GENTY et al., 1989) foi calculada usando-se a fórmula: $F_v'/F_m' = (F_m' - F_0') / F_m'$ e a taxa de transporte de elétrons (ETR) (BAKER, 2008), calculado pela fórmula: $\text{ETR} = \phi\text{FSII} \times \text{DFF} \times (0,84) \times (0,5)$, em que DFF é a densidade do fluxo de fótons ou a quantidade de luz absorvida (μm fótons $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) (BAKER, 2008).

Um espectrômetro STS-VIS (Ocean Optics) instalado no instrumento LIFT com faixa espectral de 400-800 nm foi utilizado para determinar o índice de refletância fotoquímico (PRI) e índice de vegetação com diferença normalizada (NDVI). Esses índices espectrais foram calculados da seguinte forma: $\text{NDVI} = (R_{800} - R_{640}) / (R_{800} + R_{640})$ e $\text{PRI} = (R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$. Dados com relação sinal/ruído ruins foram eliminados.

A produtividade foi determinada após a correção da umidade do grão para 13% (p/p). Em 2017, foram analisadas a qualidade dos grãos (teor de proteína e óleo,%), juntamente com a altura da planta (AP) (cm), número de vagens (NV), número de entre-nós (NEN), diâmetro do caule (D) (mm) e peso de mil grãos (PMG) (g).

Todos os dados foram submetidos ao teste de normalidade Shapiro-Wilk e foram considerados normais. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, com o auxílio do software estatístico SAS (Statistical Analysis System), versão 9.1.2. O modelo estatístico foi ajustado usando o SAS procmixed, foi usado o método de máxima verossimilhança restrita (reml).

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em 2017, não houve diferenças estatísticas para as avaliações fisiológicas e produtividade entre os tratamentos FMX, NPK e Controle dentro de cada RH individualmente para cada fase fenológica (Tabelas 2 e 3). No primeiro ano de aplicação do remineralizador, prevíamos que, devido ao pouco tempo de contato para reação e ataque químico pelos microrganismos na rizosfera, não haveria efeito da aplicação do pó de rocha (HARLEY; GILKES, 2000). De fato, apenas os efeitos dos RHs e da fase fenológica da cultura da soja foram observados, pois todas as variáveis estudadas apresentaram alterações significativas com maiores valores à medida que a água aplicada diminuiu e quando a cultura progrediu em sua fase fenológica, principalmente na fase R5.5 e sob estresse hídrico severo (Tabela 3). Além disso, durante o primeiro ano do experimento, reduções significativas em A , g_s e E ocorreram em função da RH e da fase fenológica (Tabela 3). Assim, além de limitar a entrada de CO_2 , o fechamento estomático levou a um estado de excitação excessiva das membranas dos tilacóides nos cloroplastos (Baker, 2008). Portanto, com o aumento do tempo de exposição à seca, o dano tornou-se mais severo, conforme demonstrado pelas reduções em F_v'/F_m' , Φ_{FSII} e ETR, limitando o potencial fotossintético da soja (BAKER, 2008).

A seca acelera a produção de ácido abscísico (ABA) e etileno, fitormônios diretamente relacionados ao aborto, senescência precoce de folhas e redução das trocas gasosas, culminando no amadurecimento precoce dos grãos e reduzindo a produtividade (KAR, 2011), e esses efeitos

também foram obtidos no presente trabalho. A influência da seca no metabolismo fotossintético da soja foi muito clara, uma vez que o efeito precoce do RH já era significativo na fase R4 no RH1 (Tabela 3). Nas outras fases, como R5.1 e R5.5, as reduções em F_v'/F_m' (18 e 42%), Φ_{FSII} (50 e 68%) e ETR (44 e 57%) foram drásticas. Sob seca severa, a super excitação nas membranas tilacóides culminou em danos nos tecidos das plantas, muitos dos quais foram irreversíveis, o que pode explicar as reduções de A neste trabalho (Tabela 1; DAMATTA et al., 2018). Tais danos ao metabolismo são ainda mais prejudiciais durante a fase reprodutiva (Board e Kahlon, 2011), pois a soja depende da produção de fotoassimilados para obter a máxima produtividade. Assim, a seca progressiva (Figura 1) causou também uma redução progressiva das trocas gasosas durante as fases R4, R5.1 e R5.5 (Tabela 3), resultado de danos à maquinaria fotossintética e efeitos negativos no metabolismo das plantas. Esses resultados refletiram na redução da produtividade na safra 2017, que demonstra a relação de causa e efeito da influência da seca sobre os parâmetros fisiológicos, o que pode ter influenciado na redução da produtividade da cultura (Tabela 2).

Era esperado que o tratamento com FMX diminuísse o impacto da seca na fisiologia da soja durante o segundo ano de aplicação. No entanto, em 2018, não houve diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos FMX, NPK e Controle para A , g_s e E (Tabela 4).

Ao comparar os diferentes RHs, os tratamentos com as maiores lâminas de água (RH3 e RH4) foram estatisticamente semelhantes, enquanto os RH menos irrigados (RH1 e RH2) apresentaram valores significativamente mais baixos para os parâmetros avaliados (A , g_s e E), com o RH1 apresentando os valores mais baixos para todos os dias após a supressão da irrigação (DASI) analisados, e já no 1º DASI, as reduções médias para A , g_s e E foram de 46, 56 e 32% comparando-se o RH1 com o RH4. No 8º DASI, as reduções em relação ao 1º DASI foram de 12, 26 e 41% no RH1, aumentos de 6, 17% e reduções de 41% no RH2, reduções de 23, 25 e

35% no RH3 e reduções de 5, 8 e 28% para A , g_s e E , respectivamente. Dentro do 15° DASI não houve diferenças estatísticas entre os RH, mas as reduções em relação ao 1° DASI foram de 38, 43 e 8% para o RH1 as reduções foram de 47, 56 e 29% para o RH2, 65, 71 e 29% para o RH3 e 57, 64 e 13% no RH4 para A , g_s e E , respectivamente. Após a irrigação no 17° DASI, os RH3 e RH4 apresentaram valores estatisticamente para A , g_s e E (Tabela 4). Assim, essas variáveis fisiológicas declinam rapidamente de acordo com a duração do período de seca, quando houve simulação do veranico e, no 15° DASI, foram observadas reduções de até 60% nas trocas gasosas (Tabela 4).

Após a irrigação nos 16° e 17° DASI, os valores de A , g_s e E em RH3 e RH4, apresentaram uma tendência de recuperação da capacidade fotossintética das plantas (Tabela 4). Por outro lado, em RH1 e RH2 não houve recuperação do desempenho fotossintético (Tabela 4). É possível que a seca durante a fase reprodutiva tenha levado à senescência foliar acelerada e a redução do ciclo da cultura e que, mesmo após a irrigação após o período de estresse hídrico, as variáveis A , g_s e E não tenham se recuperado (SILVA et al., 2017). Portanto, o estresse causado por veranicos causa modificações no metabolismo das plantas que levam ao encurtamento de seu ciclo, e o uso de remineralizador do solo (FMX) como condicionante não foi capaz de amenizar o efeito do estresse hídrico na fisiologia da soja (BAKER, 2008).

Os tratamentos FMX, NPK e Controle se comportaram de forma semelhante no NDVI e PRI, avaliados através de espectrômetro e os dados de fluorescência da clorofila a , ou seja, F_q'/F_m' medidos através da metodologia LIFT em 2018. A imposição do veranico simulado causou uma redução gradual nessas variáveis, mas apenas em RH1, as maiores diferenças foram observadas no último dia de avaliação (Figura 1).

Os valores de NDVI demonstraram que a seca acelerou os processos de degradação dos pigmentos, como as clorofilas, e reduziu a densidade de vegetação, e estas reduções foram mais intensas em situações de déficit hídrico severo (RH1) (Figura 1), conforme encontrado também

por Babar et al. (2006). A redução de F_q'/F_m' foi observada durante a imposição do veranico simulado para todos os RHs (Figura 1). Esses resultados indicam que todos os RHs foram afetados pelo período de veranico simulado, de modo que, o funcionamento dos centros de reação dos fotossistemas foi prejudicado e, por fim, o acúmulo de biomassa foi reduzido, como demonstrado pelas reduções de produtividade (CABRERA-BOSQUET et al., 2012; PIERUSCHKA et al. 2014).

Quando os centros de reação do fotossistema II permanecem abertos e o transporte linear de elétrons é mantido o F_q'/F_m' , caso contrário os reflexos de tais danos afetam diretamente o F_q'/F_m' , A e, portanto, a Produtividade (Figura 1, Tabela 2). Independentemente do fornecimento do remineralizador, houve uma forte redução na capacidade de absorção e transformação da energia luminosa em carboidratos, uma vez que os centros de reação do FSII permaneceram fechados, resultando em danos metabólicos, principalmente no último dia de avaliação dos tratamentos FMX, NPK e Controle (BAKER et al., 2008). Além disso, períodos secos prolongados, tais como os veranicos, causaram uma redução na capacidade da soja em dissipar o excesso de energia de excitação das membranas tilacóides através do ciclo das xantofilas, devido às reduções observadas no PRI (Figura 1), o que pode estar intimamente relacionado à capacidade de manter o funcionamento do metabolismo fotosintético durante a seca (HENDAWY et al., 2015; ELAYAYED et al., 2017).

A produtividade só foi afetada no tratamento Controle em 2017 no RH3, o que não ocorreu no ano de 2018 (Tabela 2), uma vez que todos os tratamentos neste ano foram estatisticamente semelhantes (Tabela 2). Nesse segundo ano, não houve diferença estatística entre os tratamentos FMX, NPK e Controle para nenhum dos RH estudados (Tabela 2). Todos os componentes de produção diferiram entre os RHs, e entre os tratamentos de fertilização, somente a altura de plantas foi maior no NPK no RH1 e no RH4 em relação ao FMX. (Tabela 5). Toda a área experimental foi fertilizada regularmente ao longo do tempo, a fim de eliminar

a influência de fatores nutricionais, de modo que as plantas de soja fossem afetadas apenas pela manipulação dos níveis de água. Assim, devido ao efeito residual de fertilizações na área experimental em anos anteriores, também foram observados altos rendimentos, inclusive para o tratamento Controle (Tabela 2; MALEKIAN et al., 2012; LI et al., 2014).

Os teores de proteínas e óleos nos grãos não foram afetados pelos tratamentos, e apenas responderam aos RHs aplicados (Figura 2). O conteúdo de proteína foi maior nos RH menos irrigados, ou seja, RH1 e RH2. Outros autores também obtiveram maiores teores de proteínas em grãos de leguminosas sob estresse hídrico (Silva et al., 2020). Por outro lado, a % de óleo diminuiu sob estresse hídrico. Este é um efeito comumente observado durante a seca, uma vez que a maior quantidade de água nos tratamentos mais irrigados estimula a produção de óleo e, portanto, dilui o teor de proteínas dos grãos (GHASSEMI-GOLEZANI; LOTFI, 2013). Assim, existe uma relação antagônica entre o teor de proteínas e a percentagem de óleo em relação à seca, uma vez que esse estresse tem efeitos negativos no metabolismo primário e, portanto, influencia negativamente a biossíntese lipídica, o que leva a níveis lipídicos mais baixos em situações de seca (Figura 2).

Como os experimentos foram realizados em duas safras (2017 e 2018), nossos resultados não descartam um potencial impacto positivo do remineralizador do solo quando usado por um período mais longo e, portanto, serão necessários mais experimentos para testar a hipótese de que este produto retém água no solo.

3.4. CONCLUSÕES

A presença de remineralizador do solo não afetou a maioria das variáveis fisiológicas sob regimes hídricos variáveis nos experimentos realizados em 2017 e 2018. O efeito dos níveis de água na fisiologia das plantas e na qualidade dos grãos é claro nos dois anos; a seca reduz o ciclo da planta independentemente dos tratamentos: NPK, remineralizador do solo ou controle.

Os efeitos deletérios dos períodos simulados de seca no metabolismo não foram aliviados pelo remineralizador do solo após dois anos de aplicação.

3.5. REFERÊNCIAS

- BORNHOFEN, E.; BENIN, G.; GALVAN, D.; FLORES, M.F. Épocas de semeadura e desempenho qualitativo de sementes de soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.45, p.46-55. 2015.
- BAKER, N.R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis *in vivo*. **Annual Review of Plant Biology**, v.59, p.89-113, 2008.
- BABAR, M.A.; REYNOLDS, M.P.; VAN GINKEL, M.; KLATT, A.R.; RAUN, W.R.; STONE, M.L. Spectral Reflectance to Estimate Genetic Variation for In-Season Biomass, Leaf Chlorophyll, and Canopy Temperature in Wheat. **Crop Science**, v.46, p.1046-1057, 2006.
- BOARD, J.E.; KAHN, C.S. Soybean yield formation: What controls it and how it can be improved. In: HANYA. EL-SHEMY (Ed). **Soybean Physiology and Biochemistry**, In Tech, 2011, p.1-36.
- CHOUHDURY, F.K.; RIVERO R.M.; BLUMWALD, E.; MITTLER, R. Reactive oxygen species, combination abiotic stress and stress. **The Plant Journal**, v.90, p.856–867, 2017.
- CATTELAN, A.J.; DALL’AGNOL, A. The rapid soybean growth in Brazil. **Oilseeds & fats Crops and Lipids**, v.25, p.1-12, 2018.
- CABRERA-BOSQUET, L.; CROSSA, J.; VON ZITZEWITZ, J.; SERRET, M.D.; ARAUS, J.L. High-throughput Phenotyping and Genomic Selection: The Frontiers of Crop Breeding Converge. **Journal of Integrative Plant Biology**, v.54, p.312-320, 2012.
- DAMATTA, F.M.; AVILA, R.T.; CARDOSO, A.A.; MARTINS, S.C.V.; RAMALHO, J.C. Physiological and Agronomic Performance of the Coffee Crop in the Context of Climate Change

and Global Warming: A Review. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.66, p.5264-5274, 2018.

ELSAYED, S.; DARWISH, W. Hyperspectral remote sensing to assess the water status, biomass, and yield of maize cultivars under salinity and water stress. **Bragantia**, Campinas, v.76, p.62-72, 2017.

EL-HENDAWY, S.; AL-SUHAIBANI, N.; SALEM, A.; UR REHMAN, S.; SCHMIDHALTER, U. Spectral reflectance indices as a rapid nondestructive phenotyping tool for estimating different morphophysiological traits of contrasting spring wheat germplasms under arid conditions. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v.39, p.572-587, 2015.

GENTY, B.; BRIANTAIS, J.M.; BAKER, N.R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)**, v.990, p.87-92, 1989.

HANKS, R.J.; KELLER, J.; RASMUSSEN, V.P.; WILSON, G.D. Line source sprinkler for continuous variable irrigation crop production studies. **Soil Science Society of America Journal**, v.40, p.426-429, 1976.

HARLEY, A.D.; GILKES, R.J. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview. **Nutrient Cycling in Agroecosystems** v.56, p.11-36, 2000.

JAYME-OLIVEIRA, A., JÚNIOR, W.Q.R.; RAMOS, M.L.G; ZIVIANI, A.C.; JAKELAITIS, A. Amaranth, quinoa, and millet growth and development under different water regimes in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.52, p.561-571, 2017.

KAR, R.K. Plant responses to water stress: Role of reactive oxygen species. **Plant. Signaling & Behavior**, v.6, p.1741-1745, 2011.

KELLER, B.; VASS, I.; MATSUBARA, S.; PAUL, K.; JEDMOWSKI, C.; PIERUSCHKA, R.; NEDBAL, L.; RASCHER, U.; MULLER, O. Maximum fluorescence and electron transport

kinetics determined by light-induced fluorescence transients (LIFT) for photosynthesis phenotyping. **Photosynthesis Research**, v.140, p.221-233, 2018.

GHASSEMI-GOLEZANI, K.; LOTFI, R. Influence of water stress and pod position on oil and protein accumulation in soybean grains. **International Journal of Agronomy and Plant Production**, v. 4, 2341-2345, 2013.

LI, L.; ZHANG, Q.; HUANG, D. A Review of Imaging Techniques for Plant Phenotyping. **Sensors**, v.14, p.1-34; 2014.

NOVÁK, V.; HLAVÁČIKOVÁ, H. Swelling and Shrinking Soils. In: Ed.:In: Hassanizadeh S. Majid (Ed.). **Theory and Applications of Transport in Porous Media**, p.253–262. Springer, 2018.

MARTINS, E.S.; RESENDE, A.V.; OLIVEIRA, C.G.; FURTINI NETO, A.E. Materiais silicáticos como fontes regionais de nutrientes e condicionadores de solos. In: F.R.C. Fernandes; A.B. da Luz; Z.C. Castilhos. (Org.). **Agrominerais para o Brasil**. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ: CETEM, 2010, v. 1, p. 89-104.

MALEKIAN, A.; VALIZADEH, E.; DASTOORI, M.; SAMADI, S.; BAYAT, V. Soil water retention and maize (*Zea mays* L.) growth as effected by different amounts of Pumice. **Australian Journal of Plant Science**, v.6, p.450-454, 2012.

PEÑUELAS, J.; EILALLA, I.; GAMON, J.A. Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance. **New Phytologist.**, v.131, p.291-296, 1995.

PIERUSCHKA, R.; ALBRECHT, H.; MULLER, O.; BERRY, J.A.; KLIMOV, D.; KOLBER, Z.S.; MALENOVSKÝ, Z.; RASCHER, U. Daily and seasonal dynamics of remotely sensed photosynthetic efficiency in tree canopies. **Tree Physiology** v.0, p.1–12, 2014.

PIMENTEL, M.M. The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil: a geochronological and isotopic approach. **Brazilian Journal of Geology**, v. 46, p. 67-82, 2016.

RIBEIRO, L.S.; SANTOS, A.R.; SOUZA, L.F.S.; SOUZA, J.S. Rochas silicáticas portadoras de potássio como fontes do nutriente para as plantas solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 34, p. 891-897, 2010.

SILVA, P.E.M.; SANGLARD, L.M.P.V.; ÁVILA, R.T.; MORAIS, L.E.; MARTINS, S.C.V.; NOBRES, P.; PATREZE, C.M.; FERREIRA, M.A.; ARAÚJO, W.L.; FERNIE, A.R.; DAMATTA, F.M. Photosynthetic and metabolic acclimation to repeated drought events play key roles in drought tolerance in coffee. **Journal of Experimental Botany**, v. X, p. Y, 2017.

SOUZA, F.N.S.; OLIVEIRA, C.G.; ÉDER DE SOUZA MARTINS, E.S.; ALVES, J.M. Efeitos condicionador e nutricional de um remineralizador de solos obtido de resíduos de mineração. **Revista Agri-Environmental Sciences**, v.3, 1-12, 2017.

SOUZA, F.N.S.; SANTANA, A.P.; ALVES, J.M.; MATEUS E SILVA, M.H. Efeitos de um remineralizador de solos (biotita-xisto) na produção de duas variedades de mandioca. **Revista Raízes e Amidos Tropicais**, v.12, p.45-59, 2016.

THEODORO, S.H. Experiências de uso de rochas silicáticas como fonte de nutrientes. *Espaço & Geografia*, Brasília, v. 9, n. 2, p. 263-292, 2006.

WINIWARTER, V.; BLUM, W.E.H. From marl to rock powder: On the history of soil fertility management by rock materials. **Journal of Plant Nutrition Soil Science**, v.171, p.316–324, 2008.

ZHANG, Q.; CHEN, J.M.; JU, W.; WANG, H.; QIUA, F.; YANG, F.; FAN, W; HUANG, Q.; WANG, Y-P; FENG, Y.; WANG, X.; ZHANG, F. Improving the ability of the photochemical reflectance index to track canopy light use efficiency through differentiating sunlit and shaded leaves. **Remote Sensing of Environment**, v.194, p.1-15, 2017.

Tabela 71. Análise do solo antes e após dois anos de implementação do experimento com remineralizadore de solo a uma profundidade de 0-20 cm.

Profundidade	Al - (cmol _c dm ⁻³)	Ca (cmol _c dm ⁻³)	H+Al- (cmol _c dm ⁻³)	K (cmol _c dm ⁻³)	M.O. (g dm ⁻³)	Mg (cmol _c dm ⁻³)	pH (H ₂ O)	P (mg/dm ³)	CTC(Total)	CTC(Efetiva)	SB	V%
Ano 2017												
0-20	0,069	2,317	5,461	0,301	22,46	1.146	5,74	9.868	9.225	3.834	3.765	40.807
Ano 2019												
RH1	0	5,16	3,8	2,07	44,56	2,33	6,4	31,36	13,36	9,56	9,56	70
RH2	0	5,16	3,8	1,49	42,66	2,2	6,3	41	12,65	8,85	8,85	71
RH3	0	5,83	3,8	1,51	47,2	2,4	6,3	43,7	13,58	9,74	9,74	68
RH4	0	5,73	3,9	1,55	49	2,36	6,3	44,86	13,58	9,64	9,64	66

Tabela 82. Produtividade (Kg/ha) da soja nos anos de 2017 e 2018. para os tratamentos de fertilização FMX, NPK e Controle, e regimes hídricos RH1, RH2, RH3 e RH4, nos invernos de 2017 e 2018.

	2017			2018		
	FMX	NPK	Controle	FMX	NPK	Controle
RH1	1007 Ba	1421 Ba	998 Ba	1990 Da	1930 Da	1985 Da
RH2	1544 Ba	1610 Ba	1697 Ba	2741 Ca	2569 Ca	2639 Ca
RH3	4063 Aa	4136 Aa	3114 Ab	3539 Ba	4034 Ba	3723 Ba
RH4	3524 Aa	3835 Aa	3852 Aa	4208 Aa	4425 Aa	4514 Aa

Médias seguidas pela mesma letra minúscula comparam os tratamentos (FMX, NPK e Controle) e médias seguidas pela mesma letra maiúscula comparam os regimes hídricos (RH) não diferem entre si a 5% de probabilidade usando o teste de Tukey.

Tabela 93. Fotossíntese Líquida (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Condutância Estomática (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Concentração Interna de CO_2 (C_i) ($\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}$), Taxa de Transpiração (E) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Rendimento Quântico Efetivo do Fotosistema dois (FSII) (F_v/F_m'), Rendimento do FII (ΦFSII) e Taxa de Transporte de Elétrons (ETR) em três fases fenológicas (R4, R5.1 e R5.5) para os tratamentos de fertilização FMX, NPK e Controle, e regimes hídricos RH1, RH2, RH3 e RH4, no inverno de 2017.

R4												
	RH1			RH2			RH3			RH4		
	FMX	NPK	Controle	FMX	NPK	Controle	FMX	NPK	Controle	FMX	NPK	Controle
A	13,81 Ba	13,44 Ba	14,73 Ba	20,18 Aa	21,56 Aa	19,26 Aa	20,26 Aa	20,55 Aa	20,22 Aa	19,33 Aa	20,60 Aa	19,96 Aa
g_s	0,15 Ba	0,14 Ba	0,16 Ba	0,29 Aa	0,31 Aa	0,30 Aa	0,31 Aa	0,33 Aa	0,29 Aa	0,31 Aa	0,32 Aa	0,31 Aa
C_i	218 Ba	221 Ba	223 Ba	256 Aa	252 Aa	252 Aa	259 Aa	269 Aa	258 Aa	271 Aa	267 Aa	267 Aa
E	3,32 Ba	2,91 Ba	3,44 Ba	4,73 Aa	5,15 Aa	5,15 Aa	5,07 Aa	5,39 Aa	4,92 Aa	4,93 Aa	5,56 Aa	5,14 Aa
F_v/F_m'	0,48 Aa	0,51 Aa	0,50 Aa	0,51 Aa	0,51 Aa	0,48 Aa	0,47 Aa	0,49 Aa	0,51 Aa	0,48 Aa	0,49 Aa	0,49 Aa
ΦFSII	0,21 Ba	0,20 Ba	0,21 Ba	0,25 Aa	0,25 Aa	0,25 Aa	0,27 Aa	0,25 Aa	0,26	0,24 Aa	0,26 Aa	0,26 Aa
ETR	111 Ba	98 Ba	108 Ba	130 Aa	131 Aa	129 Aa	140 Aa	133 Aa	135 Aa	118 Aa	134 Aa	137 Aa
R5.1												
	RH1			RH2			RH3			RH4		
	FMX	NPK	Controle	FMX	NPK	Controle	FMX	NPK	Controle	FMX	NPK	Controle
A	6,77 Ca	7,06 Ca	8,06 Ca	14,51 Ba	14,01 Ba	14,67 Ba	18,16 Aa	19,33 Aa	17,75 Aa	17,40 Aa	18,40 Aa	17,75 Aa
g_s	0,09 Ca	0,09 Ca	0,11 Ca	0,17 Ba	0,17 Ba	0,18 Ba	0,27 Aa	0,25 Aa	0,25 Aa	0,25 Ab	0,33 Aa	0,26 Ab
C_i	258 Ba	251 Ba	249 Ba	237 ABa	235 ABa	243 ABa	263 ABa	244 ABa	255 ABa	255 Aa	280 Aa	261 Aa
E	2,99 Ca	3,22 Ca	3,86 Ca	5,06 Ba	5,17 Ba	5,18 Ba	6,94 Aa	6,16 Aa	6,76 Aa	6,58 Aa	7,42 Aa	6,73 Aa
F_v/F_m'	0,43 Ab	0,45 Ab	0,51 Aa	0,53 Ab	0,54 Ab	0,55 Aa	0,54 Ab	0,53 Ab	0,55 Aa	0,53 Aa	0,54 Aa	0,53 Aa
ΦFSII	0,15 Ca	0,16 Ca	0,16 Ca	0,28 Ba	0,27 Ba	0,27 Ba	0,31 Aa	0,31 Aa	0,32 Aa	0,30 ABa	0,28 ABa	0,31 ABa
ETR	79 Ca	81 Ca	99 Ca	146 Ba	141 Ba	143 Ba	166 Aa	162 Aa	169 Aa	154 ABa	147 ABa	161 ABa
R5.4												
	RH1			RH2			RH3			RH4		
	FMX	NPK	Controle	FMX	NPK	Controle	FMX	NPK	Controle	FMX	NPK	Controle
A	4,26 Da	5,29 Da	7,73 Da	9,16 Ca	10,03 Ca	9,67 Ca	14,43 Ba	14,42 Ba	12,58 Ba	17,5 Aa	17,22 Aa	16,56 Aa
g_s	0,09 Ca	0,07 Ca	0,11 Ca	0,12 Ca	0,12 Ca	0,13 Ca	0,18 Ba	0,17 Ba	0,15 Ba	0,25 Aa	0,27 Aa	0,22 Aa
C_i	299 Aa	267 Aab	259 Ab	249 Aa	235 Ab	250 Aa	240 Aa	237 Aab	228 Ab	255 Aab	263 Aa	249 b
E	2,97 Ca	2,76 Ca	3,74 Ca	3,63 BCa	4,18 BCa	4,27 BCa	5,34 Ba	5,12 Ba	4,78 Ba	6,07 Aa	7,59 Aa	6,34 Aa
F_v/F_m'	0,31 Ca	0,35 Ca	0,45 Ca	0,44 Ba	0,47 Ba	0,50 Ba	0,52 ABa	0,53 ABa	0,49 ABa	0,54 Aa	0,54 Aa	0,55 Aa
ΦFSII	0,09 Ca	0,13 Ca	0,16 Ca	0,18 Ba	0,22 Ba	0,20 Ba	0,28 Aa	0,27 Aa	0,28 Aa	0,28 Aa	0,29 Aa	0,32 Aa
ETR	48,39 Ca	69,86 Ca	83,31 Ca	94 Ba	115 Ba	106 Ba	145 Aa	142 Aa	144 Aa	147 Aa	156 Aa	167 Aa

Letras minúsculas comparam os tratamentos (FMX, NPK e Controle) dentro cada RH e maiúsculas comparam cada tratamento nos RH em cada fase fenológica, à 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Tabela 104. Fotossíntese (*A*) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Condutância Estomática (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e Transpiração (*E*) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) em quatro períodos de avaliação da soja, para os tratamentos de fertilização FMX, NPK e Controle, e regimes hídricos RH1, RH2, RH3 e RH4, no inverno de 2018.

	1° DASI				8° DASI				15° DASI				17° DASI			
	RH1	RH2	RH3	RH4	RH1	RH2	RH3	RH4	RH1	RH2	RH3	RH4	RH1	RH2	RH3	RH4
FMX	9,95 Ca	10,89 Ba	17,57 Aa	18,41 Aa	8,53 Ca	14,12 Ba	13,43 Ba	16,83 Aa	5,88 Aa	7,67 Aa	6,64 Aa	7,49 Aa	4,92 Ba	6,01 Ba	9,40 Aa	10,06 Aa
A NPK	8,75 Ca	14,24 Ba	17,25 Aa	18,07 Aa	7,65 Ca	15,28 Ba	13,21 Ba	17,65 Aa	5,67 Aa	6,38 Aa	4,71 Aa	9,05 Aa	5,80 Ba	8,17 Ba	9,24 Aa	11,01 Aa
Controle	10,27 Ca	15,05 Ba	18,17 Aa	17,68 Aa	9,30 Ca	13,43 Ba	13,88 Ba	16,66 Aa	6,26 Aa	7,30 Aa	6,99 Aa	6,59 Aa	5,03 Ba	6,19 Ba	9,76 Aa	9,92 Aa
FMX	0,12 Ca	0,14 Ba	0,26 Aa	0,29 Aa	0,09 Ca	0,21 Ba	0,2 Ba	0,25 Aa	0,07 Ba	0,08 Ba	0,08 Ba	0,099 Aa	0,07 Ba	0,07 Ba	0,13 Aa	0,13 Aa
gs NPK	0,11 Ca	0,18 Ba	0,24 Aa	0,26 Aa	0,09 Ca	0,23 Ba	0,19 Ba	0,27 Aa	0,07 Ba	0,07 Ba	0,064 Ba	0,11 Aa	0,08 Ba	0,10 Ba	0,13 Aa	0,14 Aa
Controle	0,13 Ca	0,21 Ba	0,29 Aa	0,28 Aa	0,11 Ca	0,18 Ba	0,20 Ba	0,24 Aa	0,08 Ba	0,08 Ba	0,08 Ba	0,09 Aa	0,08 Ba	0,08 Ba	0,13 Aa	0,13 Aa
FMX	3,27 Ba	3,62 Aa	4,25 Aa	5,15 Aa	1,91 Ca	3,00 Ba	2,85 Ba	3,43 Aa	2,98 Ba	3,18 Ba	3,12 Ba	4,26 Aa	2,279 Ba	2,41 Ba	3,33 Aa	3,34 Aa
E NPK	3,12 Ba	4,49 Aa	4,2 Aa	4,76 Aa	1,89 Ca	3,23 Ba	2,73 Ba	3,66 Aa	2,84 Ba	2,88 Ba	2,65 Ba	4,57 Aa	2,58 Ba	3,03 Ba	3,30 Aa	3,38 Aa
Controle	3,56 Ba	4,82 Aa	4,51 Aa	4,76 Aa	2,07 Ca	2,83 Ba	2,84 Ba	3,37 Aa	3,28 Ba	3,08 Ba	3,33 Ba	3,89 Aa	2,62 Ba	2,57 Ba	3,30 Aa	3,18 Aa

Letras minúsculas comparam dentro de cada período de avaliação e em cada RH os três tratamentos (FMX, NPK e Controle) e letras maiúsculas comparam dentro de cada período avaliado (dia após a supressão da irrigação - DASI) o RH para cada tratamento individualmente com 5% de probabilidade usando o Teste de Tukey.

Tabela 115. Altura da planta (AP) (cm), Número de Vagens (NV), Número de Entre-Nós (NI), Diâmetro do Coleto (D) (mm) e Peso de Mil Grãos (PMG) (g) de soja para os tratamentos de fertilização FMX, NPK e Controle, e regimes hídricos RH1, RH2, RH3 e RH4, avaliados durante 10 dias de privação de água no inverno de 2018 e regimes hídricos RH1, RH2, RH3 e RH4, no inverno de 2017.

		RH1	RH2	RH3	RH4
AP	FMX	51,17 (Cb)	58,85 (Ba)	70,87 (Ba)	64,00 (Ab)
	NPK	57,11 (Ba)	57,87 (Ba)	69,52 (Aa)	69,97 (Aa)
	Controle	51,62 (Cb)	59,52 (Ba)	68 (Aa)	66,30 (Aab)
NV	FMX	20,01 (Ba)	27,15 (Ba)	39,12 (Aa)	40,55 (Aa)
	NPK	20,04 (Ba)	27,45 (Ba)	38,17 (Aa)	36,20 (Aa)
	Controle	18,75 (Ba)	30,02 (Ba)	37,97 (Aa)	43,8 (Aa)
NEN	FMX	11,98 (Ca)	13,7 (Ba)	15,00 (ABa)	14,62 (Aa)
	NPK	12,20 (Ca)	13,2 (Ba)	14,8 (ABa)	14,45 (Aa)
	Controle	11,85 (Ca)	13,85 (Ba)	14,60 (ABa)	14,70 (Aa)
D	FMX	5,53 (Ba)	5,72 (Ba)	6,58 (ABa)	5,95 (Aa)
	NPK	5,68 (Ba)	5,66 (Ba)	6,30 (ABa)	5,86 (Aa)
	Controle	5,46 (Ba)	5,92 (Ba)	6,07 (ABa)	6,06 (Aa)
PMG	FMX	8,13 (Da)	9,05 (Ca)	11,36 (Ba)	11,89 (Aa)
	NPK	7,85 (Da)	8,60 (Ca)	10,98 (Ba)	12,37 (Aa)
	Controle	8,06 (Da)	9,12 (Ca)	11,43 (Ba)	12,02 (Aa)

As médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas, não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey com 5% de probabilidade.

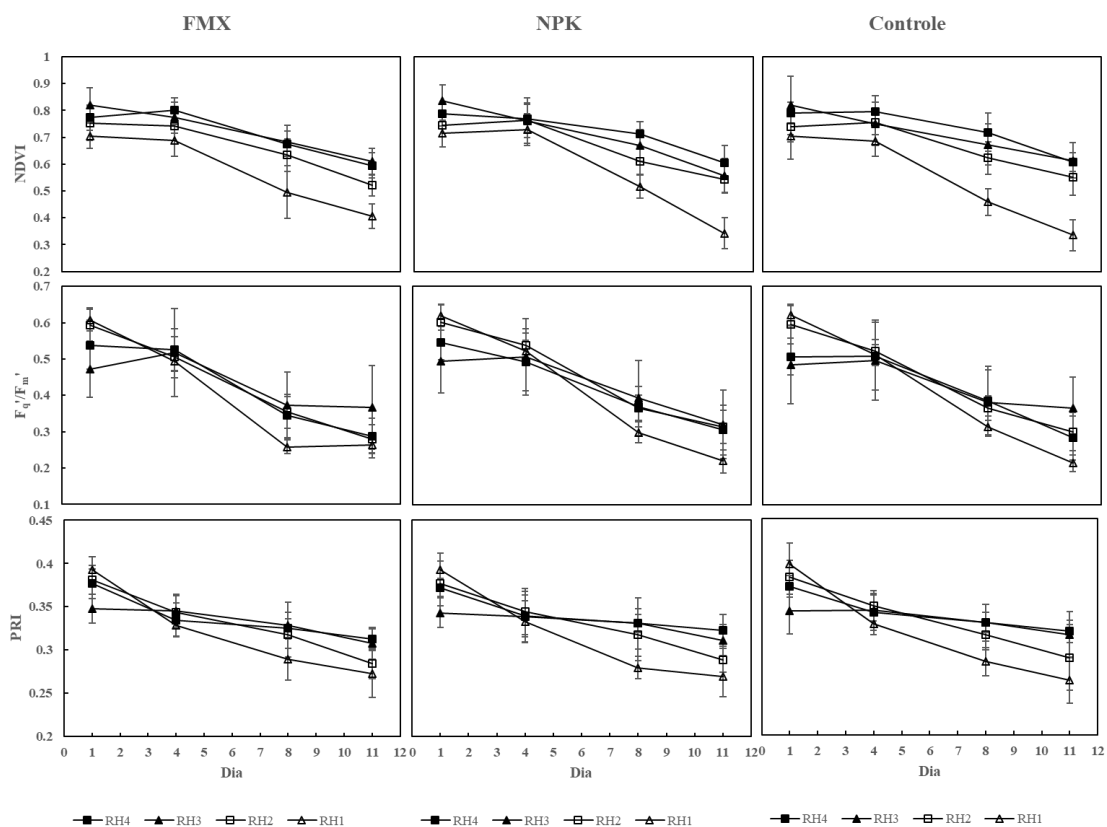


Figura 1. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Rendimento Quântico Operacional do Fossistema II (F_q/F_m') e Índice Fotoquímico de Reflectância (PRI) para os tratamentos de fertilização FMX, NPK e Controle, avaliados durante 10 dias de privação de água no inverno de 2018 e regimes hídricos RH1, RH2, RH3 e RH4.

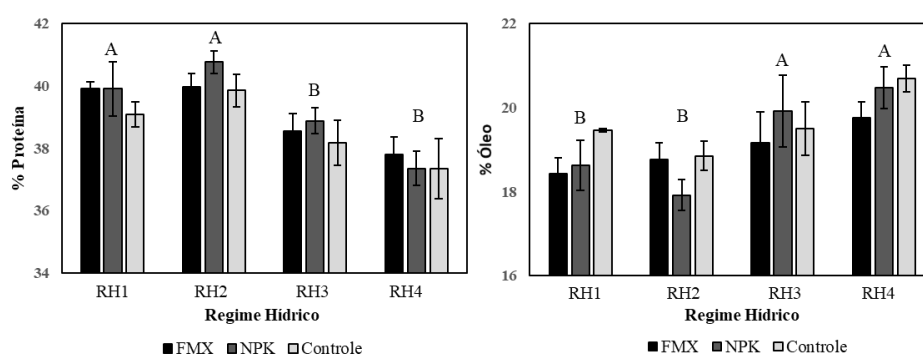


Figura 2. Teor de Proteína (%) e Óleo nos grãos de soja, para os tratamentos de fertilização FMX, NPK e Controle, avaliados durante 10 dias de privação de água no inverno de 2018 e regimes hídricos RH1, RH2, RH3 e RH4. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente das demais pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca por novas tecnologias com vistas a facilitar e potencializar a produção agrícola certamente continuará, uma vez que a demanda por alimentos é crescente. Mas, os desafios que cada cultura perpassa ao longo de seu ciclo podem também ser amenizados através do melhoramento de plantas. O instrumento LIFT, demonstrou ser extremamente efetivo em avaliações em campo e seu enorme volume de dados coletado permitiu a redução do erro experimental (que normalmente é grande em condições de campo) e com isso, possibilitou um ajuste fino das respostas obtidas. Não descartamos outras ferramentas, mas deixamos claro que, a aplicação prática da fluorescência da clorofila *a* e índices de vegetação obtidos por espectrômetros tendem a ser muito mais efetivos e seus dados, demonstram com mais clareza os reflexos da seca na soja, além de possuir enorme aplicabilidade em programas de melhoramento em larga escala. A prova disso é que, mesmo em cultivares recomendadas para a região Centro-Oeste do Brasil, que possuem características semelhantes no que tange a resistência à seca, foi possível a distinção entre as cultivares. Assim, de posse das fortes correlações entre as variáveis resposta, é possível afirmar que com o instrumento LIFT, é possível realizar a fenotipagem sem depender de qualquer outra variável resposta na cultura da soja.

Polímeros ou hidrogéis já são empregados em cultivos perenes, mas o seu uso em cultivos anuais ainda permanecia pouco estudado. No primeiro ano, as respostas produtivas foram idênticas ao tratamento Controle e assim, mesmo que o metabolismo fotossintético respondesse negativamente, a produtividade não foi prejudicada. Mas, no segundo ano, houve uma resposta que pode representar uma alternativa para cultivos não irrigados; em casos de déficit hídrico moderado, a produtividade foi mantida e possivelmente, durante todo o período compreendido entre uma irrigação e outra, o polímero pôde suprir a demanda hídrica da cultura, com reflexos positivos no metabolismo fotossintético e expressivos aumentos na produtividade. Entretanto,

tais aumentos podem ser o resultado de adubações frequentes e ainda, de um possível efeito residual, mas sua viabilidade econômica a nível de campo em culturas anuais deve ser esclarecida.

A aplicação de pó de rochas ao solo, mesmo que represente uma estratégia para rejuvenescimento, com o fornecimento de minerais pouco intemperizados, pode representar uma estratégia nutricional excepcional. Entretanto, o pó de rocha analisado não teve efeito na retenção de água no solo, ao longo de dois anos de experimentos de campo. Mas, é demasiadamente ousado prever que em apenas dois anos obteríamos respostas que possivelmente fogem à noção temporal e imediatista contemporânea. Assim, este estudo deve ser tratado com a devida cautela e as respostas de longo prazo do pó de rocha como condicionante físico e químico não devem ser descartadas.