

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GENÉTICA E MELHORAMENTO

LEONARDO HUMBERTO SILVA E CASTRO

**RESISTÊNCIA E CAPACIDADE DE RESILIÊNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO
EM SOJA: RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E DESEMPENHO AGRONÔMICO**

ALEGRE, ES

2020

LEONARDO HUMBERTO SILVA E CASTRO

**RESISTÊNCIA E CAPACIDADE DE RESILIÊNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO
EM SOJA: RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E DESEMPENHO AGRONÔMICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de Doutor em Genética e Melhoramento.

Orientador Prof. Dr. Paulo Cezar Cavatte.

ALEGRE, ES

2020

LEONARDO HUMBERTO SILVA E CASTRÔ

**RESISTÊNCIA E CAPACIDADE DE RESILIÊNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO
EM SOJA: RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E DESEMPENHO AGRONÔMICO**

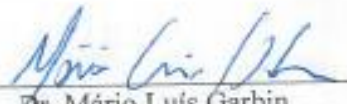
Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de Doutor em Genética e Melhoramento.

Aprovado em 13 de março de 2020.

COMISSÃO EXAMINADORA



Dra. Tais Cristina Bastos Soares
Membro interno ao Programa - UFES



Dr. Mário Luís Garbin
Membro Externo ao Programa - UFES



Dr. Josimar Aleixo da Silva
Membro externo à Instituição



Dr. Paulo César Cavatta
Orientador - UFES

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

C355r Castro, Leonardo Humberto Silva e, 1988-
Resistência e capacidade de resiliência ao déficit hídrico em soja: respostas fisiológicas e desempenho agrônomo / Leonardo Humberto Silva e Castro. - 2020.
86 f. : il.

Orientador: Paulo Cezar Cavatte.
Tese (Doutorado em Genética e Melhoramentos) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. fenotipagem. 2. condição limitante. 3. fisiologia da produção. 4. estresse hídrico. 5. melhoramento genético. 6. fisiologia vegetal. I. Cavatte, Paulo Cezar. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. III. Título.

CDU: 631.523

Aos meus queridos pais, Luiz Humberto de Castro e Márcia Euflásia da Silva Castro (*in memoriam*), que são meus exemplos de vida, valores e amor; ao meu amado irmão, Luiz Gustavo Silva e Castro; à minha companheira Mariana Aparecida Bianchini; e a todos que estão sempre torcendo por mim.

DEDICO MINHA TESE DE DOUTORADO

DESAFIOS...

“Se você acreditar, o mundo melhora. Se você acreditar, a dor vai embora. Se você acreditar, tudo dá certo. Se você acreditar, a vida vai se transformar.” (Alexandre Francisco da Silva)

“O que crê, apenas admite; mas o que se ilumina, vibra e sente.” (Francisco Cândido Xavier)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, à minha família, em especial ao meu pai, Luiz Humberto de Castro, minha mãe, Márcia Euflásia da Silva Castro (*in memoriam*), por serem a fonte primária de minha atual existência, e ao meu irmão, Luiz Gustavo Silva e Castro, que é meu exemplo de garra e superação. À minha companheira Mariana Aparecida Bianchini, pelo carinho e apoio dado nesta luta. À Universidade Federal do Espírito Santo, em nome de meu orientador Paulo Cezar Cavatte, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo, pelo apoio financeiro ao meu doutorado. Ao grande amigo e companheiro que adquiri neste período de doutorado, Lindomar de Souza Machado. Aos envolvidos na minha pesquisa, em especial ao Josimar Aleixo e João Vitor Toledo. Aos colegas do Programa de Pós-graduação em Genética e Melhoramento (PPGGM), pelo companheirismo. À Sabrina secretária do PPGGM, por todo auxílio ao longo desses anos. E em especial aos colegas de república e a todos os amigos que adquiri neste período em Alegre-ES. Todos, em suma, estão em meu coração e em minha mente.

Gratidão! Este é o sentimento na conclusão deste doutorado. Sem vocês tudo seria mais difícil.

BIOGRAFIA

LEONARDO HUMBERTO SILVA E CASTRO, filho de Luiz Humberto de Castro e Márcia Euflásia da Silva Castro, nasceu em 25 de maio de 1988, na cidade de Araxá, Estado de Minas Gerais. No ano de 2012, graduou-se em Agronomia pelo Centro Universitário do Planalto de Araxá. No ano de 2015, concluiu o *MBA* em Gestão Estratégica de Negócios pelo Instituto Nacional de Gestão Estratégica. No ano de 2015, obteve o título de Mestre em Agronomia pela Universidade Federal de Uberlândia. No ano de 2016, conclui o *MBA* em Gestão de Pessoas e Coaching pela Universidade Cândido Mendes. No ano de 2015, ingressou-se no curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, submetendo-se à defesa de Doutorado em 13 de março de 2020.

RESUMO

CASTRO, L.H.S. Resistência e capacidade de resiliência ao déficit hídrico em soja: respostas fisiológicas e desempenho agrônomo. 2020. 99f. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre-ES.

A cultura da soja é altamente estratégica do ponto de vista produtivo e alimentar. Porém, com as mudanças climáticas, ocorrerão eventos de seca ao longo do ciclo produtivo, que são altamente impactantes na produtividade de grãos. As plantas podem expressar respostas agrônomicas e fisiológicas distintas sob limitação hídrica, o que requer um estudo aprofundado visando verificar as que mais se relacionam à performance produtiva da soja nessa condição estressante. Os objetivos do presente estudo foram conhecer a capacidade de resiliência e o impacto da limitação hídrica imposta em diferentes estádios fenológicos da cultura sobre o desempenho produtivo e fisiológico da soja; conhecer o período mais crítico em relação à disponibilidade hídrica ao longo de todo o ciclo da cultura; e desenvolver um protocolo eficiente para a seleção fenotípica visando à resistência ao déficit hídrico em soja. Foi conduzido um experimento de déficit hídrico sob condições controladas de casa de vegetação, empregando-se o delineamento experimental inteiramente casualizado em esquema fatorial duplo (2 cultivares x 6 regimes hídricos), com quatro repetições. Foram cultivadas plantas das cultivares de soja MG/BR 46 (Conquista) e Vtorial IPRO em vasos de 5 L sob condições hídricas normais até a imposição dos regimes hídricos ao longo do desenvolvimento da cultura. Os tratamentos empregados foram: T1: controle (condições hídricas normais); T2: déficit hídrico (DH) imposto no estágio V4; T3: DH imposto no estágio R2; T4: DH imposto no estágio R5; T5: DH imposto nos estádios V4 e R2; T6: DH imposto nos estádios V4 e R5. Para o monitoramento preciso do consumo hídrico das plantas, foram utilizados lisímetros de pesagem, vasos e balanças de precisão, conectados a um software supervisor, que realizava a leitura e armazenamento dos dados dos pesos das balanças, permitindo-se calcular a transpiração real diária obtida entre 06h00min e 18h00min. O DH foi imposto gradativamente, com base na capacidade de campo (CC) do tratamento controle, com queda de 15% a cada dois dias até se atingir 60% da CC, permanecendo esta limitação até o atingimento do ponto de murcha fisiológico. No dia seguinte, foi procedida a fenotipagem, com posterior retomada das condições hídricas normais. A fenotipagem foi realizada por caracteres agrônomicos e características fisiológicas. Foram realizadas a análise de variância, testes de médias, importância de caracteres, correlações fenotípicas e análise de trilha. As duas cultivares apresentaram capacidade de resiliência e resistência ao déficit hídrico (DH). O DH isolado de outros fatores abióticos ocasionou impactos significativos sobre caracteres agrônomicos e características fisiológicas, principalmente na fase reprodutiva. Foi constatado que o estágio reprodutivo R5 é o período mais crítico ao déficit hídrico e o V4 no vegetativo. Foram considerados dois protocolos de seleção visando à resistência ao DH em soja: (i) seleção de impacto com DH gradual no R5, avaliando as características fenotípicas: APM, NVPP, NGPV, PCG, IC e PROD; A , g_s , q_L , E , EUA, F_v/F_m , e os índices de CL, FLAV, ANT e BIN; e (ii) seleção precoce com DH gradual no V4, avaliando as características fenotípicas: A , g_s , E , EUA, e os índices de CL, FLAV e ANT. A partir dos resultados obtidos, além da resistência ao DH, estes protocolos possibilitam a seleção de genótipos com elevado desempenho produtivo. Os equipamentos utilizados para as análises fisiológicas apresentam grande aplicabilidade por serem técnicas não invasivas e não destrutivas, e possibilitarem a avaliação de elevado número de indivíduos em pouco tempo.

Palavras-chave: *Glycine max*, fenotipagem, condição limitante, fisiologia da produção

ABSTRACT

CASTRO, L.H.S. Resistance and resilience capacity to water deficit in soybean: physiological responses and agronomic performance. 2020. 99p. Thesis (Doctorate degree in Genetics and Breeding) – Espirito Santo Federal University, Alegre-ES.

The soybean crop is highly strategic both from the production and food point of view. However, with climate change, drought events occur along the productive cycle, which are highly impactful on grain yield. The plants can express agronomic and physiological responses under different hydric restrictions, which requires an in-depth study aiming to check the soybeans that correlate to the productive performance of soybean in stressful condition. The objectives of this study were to know the capacity of resilience and the impact of water limitation imposed at different phenological stages of the soybean crop on productive performance and physiological effect; knowing the most critical period in relation to the availability of water throughout the crop cycle; and develop an efficient protocol for phenotypic selection aiming to resistance to water deficit in soybeans. An experiment of water deficit under controlled conditions in a greenhouse was conducted, using a completely randomized experimental design in factorial scheme (2 cultivars x 6 water regimes), with four replications. MG/BR 46 (Conquista) and Vtorial IPRO soybean cultivars were cultivated in pots of 5 L under normal water conditions until the imposition of the water regimes along the crop development. The treatments tested were: T1: control (normal water conditions); T2: water deficit (WD) imposed at V4 stage; T3: WD imposed at R2 stage; T4: WD imposed at R5stage; T5: WD imposed at V4 and R2stages; T6: WD imposed at V4 and R5stages. For accurate monitoring of the water consumed by the plants, weighing lysimeters were used, pots and precision balances, connected to a supervisory software, which performed the reading and storage of the data of the balance weights. It allowed to calculate the real transpiration rate obtained between 06h00min and 18h00min. The WD was imposed gradually based on the field capacity (CC) of the control treatment, with a drop of 15% every two days until it reaches 60% of the CC, remaining this limitation until the achievement of physiological wilting point. On the next day, the phenotyping was performed, with subsequent resumption of normal water conditions. The phenotyping was performed by agronomic traits and physiological characteristics. The analysis of variance tests, averages, importance of characters, phenotypic correlations and path analysis were performed. Both cultivars showed resilience capacity and resistance to water deficit. The WD isolated from other abiotic factors resulted in significant impacts on agronomic traits and physiological characteristics, mainly in the reproductive phase. It was observed that the reproductive stage R5 is the most critical period to water deficit and the V4 in the vegetative stage. Two protocols were considered for phenotyping selection aiming the resistance to WD in soybeans: (i) impact selection with gradual WD in R5, evaluating the phenotypic characteristics: APM, NVPP, NGPV, PCG, IC and PROD; A , g_s , q_L , and EUA, F_v/F_m , and the indices of CL, FLAV, ANT and BIN; and (ii) early selection with gradually WD during the V4, evaluating the phenotypic characteristics: A , g_s , and, EUA, and the indices of CL, FLAV and ANT. From the results obtained, in addition to the resistance to WD, these protocols allow the selection of genotypes with high productive performance. The equipment used for physiological analyzes have great applicability for being non-invasive techniques and not destructive, and they permit the evaluation of large numbers of individuals in a short time.

Keywords: *Glycine max*, phenotyping, limited condition, production physiology

LISTA DE ABREVIATURAS E UNIDADES

APM = altura da planta na maturidade (cm)

AIPV = Altura de inserção da primeira vagem (cm)

NVPP = Número de vagens por planta (un)

NGPV = Número de grãos por vagem (un)

PCG = Peso de cem grãos (g)

IC = Índice de colheita

PROD = Produtividade de grãos (kg ha⁻¹)

A = Taxa fotossintética líquida ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

g_s = Condutância estomática ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

q_L = Coeficiente fotoquímico

F_v'/F_m' = Eficiência fotoquímica efetiva

F_v/F_m = Rendimento quântico do fotossistema II

E = Taxa de transpiração ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

Tr = Transpiração real (L)

A/E = Eficiência instantânea de uso da água ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)

A/ g_s = Eficiência intrínseca de uso da água ($\mu\text{mol mmol}^{-1}$)

EUA = Eficiência agrônômica de uso da água (L g⁻¹)

TE = Eficiência de transpiração (g L⁻¹)

CL = Índice de clorofila

FLAV = Índice de flavonoides

ANT = Índice de antocianinas

BIN = Índice do balanço interno de nitrogênio

MST = Matéria seca total (g)

CR = Comprimento radicular (cm)

FMPA = Fração de matéria da parte aérea

FMR = Fração de matéria radicular

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estádios fenológicos da cultura da soja.	5
Tabela 2. Parâmetros de solos medidos no substrato dos lisímetros de pesagem.	21
Tabela 3. Médias dos caracteres agronômicos avaliados em duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes hídricos.	25
Tabela 4. Médias de características fisiológicas avaliadas em de duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes hídricos.	28
Tabela 5. Médias de características fisiológicas avaliadas em duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes hídricos.	30
Tabela 6: Transpiração real ($Tr - \%$) por fases do desenvolvimento de duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes hídricos.....	32
Tabela 7: Transpiração real ($Tr - \%$) por estágio fenológico de duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes hídricos.	33
Tabela 8: Médias de características fisiológicas avaliadas em duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes hídricos.	35
Tabela 9: Médias de características fisiológicas avaliadas em duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes hídricos.	37
Tabela 10. Importância de caracteres fenotípicos avaliados em duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes.	39
Tabela 11. Correlações fenotípicas entre caracteres agronômicos e características fenotípicas avaliadas em duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes hídricos.	41
Tabela 12. Estimativas das correlações de Pearson entre caracteres agronômicos e características fisiológicas avaliadas em duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes hídricos.....	42
Tabela 13. Estimativas dos efeitos fenotípicos diretos e indiretos realizados com os dados de média das duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes hídricos., realizadas com os dados de média duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes hídricos.....	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Conjuntos de lisímetros de pesagem. A: vaso de 5L preenchido com solo coberto com serragem e disco de isopor, e planta de soja; B: disposição dos vasos em balanças de precisão.	14
Figura 2: Variáveis meteorológicas temperatura do ar (T - °C), umidade relativa do ar (UR - %) e déficit de pressão de vapor de água (DPV - kPa), e radiação fotossinteticamente ativa (PAR – mol m ⁻² dia ⁻¹), ao longo da duração do experimento sob condições de casa de vegetação.....	20
Figura 3. Parte aérea e sistema radicular da planta no estágio R8 da cultivar MG/BR 46 (Conquista) (A) e Vtorial IPRO (B), cultivada sob condições hídricas normais.	21
Figura 4. Planta da cultivar MG/BR 46 (Conquista), com imposição de limitação hídrica no estágio V4: antes (A), após o déficit (B) e depois da reidratação (C), e parte aérea (D) e sistema radicular (E) no estágio R8.	22
Figura 5. Planta da cultivar Vtorial IPRO, com imposição de limitação hídrica no estágio V4: antes (A), após o déficit (B) e depois da reidratação (C), e parte aérea (D) e sistema radicular (E) no estágio R8.....	22
Figura 6. Planta da cultivar MG/BR 46 (Conquista), com imposição de limitação hídrica no estágio R2: antes (A), após o déficit (B) e depois da reidratação (C), e parte aérea (D) e sistema radicular (E) no estágio R8.	23
Figura 7. Planta da cultivar Vtorial IPRO, com imposição de limitação hídrica no estágio R2: antes (A), após o déficit (B) e depois da reidratação (C), e parte aérea (D) e sistema radicular (E) no estágio R8.....	23
Figura 8. Planta da cultivar MG/BR 46 (Conquista), com imposição de limitação hídrica no estágio R5: antes (A), após o déficit (B) e depois da reidratação (C), e parte aérea (D) e sistema radicular (E) no estágio R8.	23
Figura 9. Planta da cultivar Vtorial IPRO, com imposição de limitação hídrica no estágio R5: antes (A), após o déficit (B) e depois da reidratação (C) e parte aérea (D) e sistema radicular (E) no estágio R8.....	24
Figura 10. Planta da cultivar MG/BR 46 (Conquista), com imposição de limitação hídrica nos estádios V4 e R2: V4: antes (A), após o déficit (B) e depois da reidratação (C), e no R2: antes D, após o déficit (E) e depois da reidratação (F), e parte aérea (G) e sistema radicular (H) no estágio R8.	24
Figura 11. Planta da cultivar Vtorial IPRO, com imposição de limitação hídrica nos estádios V4 e R2: V4: antes (A), após o déficit (B) e depois da reidratação (C), e no R2: antes D, após o déficit (E) e depois da reidratação (F), e parte aérea (G) e sistema radicular (H) no estágio R8.....	24
Figura 12. Planta da cultivar MG/BR 46 (Conquista), com imposição de limitação hídrica nos estádios V4 e R5; V4: antes (A), após o déficit (B) e depois da reidratação (C), e no R5: antes D, após o déficit (E) e depois da reidratação (F), e parte aérea (G) e sistema radicular (H) no estágio R8.	24

Figura 13. Planta da cultivar Vtorial IPRO, com imposição de limitação hídrica nos estádios V4 e R5; V4: antes (A), após o déficit (B) e depois da reidratação (C), e no R5: antes D, após o déficit (E) e depois da reidratação (F), e parte aérea (G) e sistema radicular (H) no estágio R8..... 25

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 A cultura da soja	4
2.2 Respostas fisiológicas ao déficit hídrico	6
2.3 Melhoramento genético visando resistência ao déficit hídrico	9
3 MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1. Especificações experimentais	13
3.2. Fenotipagem e análises estatísticas	15
3.2.1. Caracteres agronômicos	15
3.2.2. Características fisiológicas	17
3.2.3. Análises estatísticas	18
4 RESULTADOS	20
5 DISCUSSÃO	45
6 CONCLUSÕES GERAIS	56
7 REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO GERAL

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) está entre as cinco maiores culturas produzidas globalmente (FOYER et al., 2016). Trata-se de importante fonte de alimentos, por ser rica em proteínas e óleo (PAGANO e MIRANSARI, 2016). O clima tem a capacidade de afetar por caminhos complexos o crescimento das culturas e, concomitantemente a produção de alimentos. Em suma, devido à dependência relacionada à precipitação e temperatura ao longo de todo o ciclo (ROSENZWEIG e PARRY, 1994; SCHMIDHUBER e TUBIELLO, 2007).

São previstos para as próximas décadas o aquecimento da superfície terrestre e alterações sobre a precipitação, com maior frequência de eventos extremos, devido ao fenômeno das mudanças climáticas globais (ROSE et al., 2016). Porém, os estresses abióticos ocorrem simultaneamente, sendo difícil a detecção da relação entre qualquer fator climático de forma isolada sob a produtividade (LENG et al., 2016). Portanto, é necessário o desenvolvimento de estudos que isolem qualquer outro fator, para se conhecer o real impacto da limitação hídrica sobre a produtividade de grãos de soja.

O déficit hídrico é o fator mais limitante para a agricultura, o qual tem grande potencial para gerar perdas significativas na produtividade das principais culturas agrícolas (FRACASSO, TRINDADE e AMADUCCI, 2016). A cultura da soja é uma importante commodity agrícola, mas isso não a isenta dos problemas advindos da deficiência hídrica. O Brasil, é um dos poucos países que pode incrementar de maneira substancial a produção dessa cultura nas próximas décadas (HONNA et al., 2016). Entretanto, a limitação hídrica tem a capacidade de ocasionar grandes perdas na produtividade mundial de grãos. Isto é agravado quando esta adversidade ambiental ocorre na fase reprodutiva, com potencial de redução acima de 40% (TRAN et al., 2010; HU e XIONG, 2014).

Diante deste cenário, torna-se necessário o estabelecimento da resiliência frente à escassez dos recursos naturais, tais como a água, com vistas à adaptação desejada de tecnologias (BENNETT et al., 2014). Resiliência é tida como a capacidade de desenvolvimento, mesmo em um ambiente de alterações das condições normais, permanecendo dentro de limites críticos e preservando os principais processos essenciais (FOLKE et al., 2010). Dentre as estratégias ótimas, deve-se realizar uma atenciosa gestão

dos recursos naturais e manter ou incrementar a resiliência e a capacidade de estabilidade de sistemas de produção (BILLORE, DUPARE e SHARMA, 2018).

Portanto, é necessário um aprofundado estudo de características, que possam atuar de forma direta ou indireta no desempenho produtivo das culturas. As plantas desenvolvem uma série de respostas para lidar com períodos de limitação hídrica, através de mecanismos morfológicos, fisiológicos, bioquímicos, celulares e moleculares, (FANG e XIONG, 2015). A resistência ao déficit hídrico tem uma amplitude conceitual que envolve características adaptativas ativadas através de mecanismos de resistência (LEVITT, 1980). Em relação aos mecanismos de resistência, existe o de escape ao déficit, encurtando o seu ciclo; o de evasão ao período de limitação hídrica, por meio da elevação do seu potencial hídrico, adiando a desidratação; e de tolerância ao déficit, não alterando o potencial hídrico, mas tolerando a desidratação (TURNER, 1986; 1997). Portanto, ela é tida como o grau que uma planta expressa para se adaptar à condição estressante (CHAVES, MAROCO e PEREIRA, 2003).

O melhoramento genético tem papel importante para aumentar a produtividade das culturas (QIN et al., 2017). Sendo este, um dos mais importantes objetivos dos programas de melhoramento de soja (ALMEIDA e KIIHL, 1998). Diversos melhoristas de plantas acreditam que a prática de seleção de genótipos com elevado desempenho produtiva em um ambiente de mudança lenta produzirá cultivares com maior capacidade de resiliência para otimizar o rendimento produtivo (COBER e MORRISON, 2019). Acredita-se que o uso de caracteres secundários para a seleção de genótipos superiores em condições de deficiência hídrica pode tornar este processo mais consistente. O que permite quantificar o dano do déficit hídrico antes do período de maturação, gerando um critério de seleção precoce (BÄNZINGER et al., 2000).

Nos processos de seleção de cultivares para a tolerância ao déficit hídrico, é importante adotar técnicas de fenotipagem, que utilizem características fenotípicas não invasivas e não destrutivas, e que permitam a avaliação de maior número de indivíduos com maior precisão (CHEN et al., 2011). Portanto, devem ser adotadas características fisiológicas específicas e bem definidas (GHANEM, MARROU e SINCLAIR, 2015). Neste sentido, para se melhorar o processo de fenotipagem, é exigida uma ferramenta acurada, para se identificar o desempenho produtivo e a capacidade de resiliência das plantas nessas condições (THIRY et al., 2016), agregando no tempo e no espaço o

desempenho da cultura e a eficiência no uso dos recursos naturais (ARAUS et al., 2002; 2008).

Os objetivos do presente estudo foram conhecer a capacidade de resiliência e o impacto da limitação hídrica imposta em diferentes estádios fenológicos da cultura sobre o desempenho produtivo e fisiológico da soja; conhecer o período mais crítico em relação à disponibilidade hídrica ao longo de todo o ciclo da cultura; e desenvolver um protocolo eficiente para a seleção fenotípica visando à resistência ao déficit hídrico em soja.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura da soja

Dentre as espécies vegetais economicamente exploradas em todo o mundo, as leguminosas têm papel importante para a manutenção e o avanço da sustentabilidade agrícola, como a soja cultivada (*Glycine max* [L.] Merrill), a qual tem sua origem no continente asiático. A soja apresenta grande importância comercial em todo o mundo, devido suas características nutritivas e propriedades funcionais, diversificação de formas de uso e por ser capaz de se adaptar a diferentes condições edafoclimáticas (MORCELI et al., 2008). Seus grãos apresentam elevado conteúdo de óleo, proteínas, isoflavonas, dentre outros compostos bioativos (HASANAH et al., 2015). Portanto, é bastante utilizada na indústria alimentar animal e humana, além de ser base para a produção de biocombustível (KINNEY e CLEMENTE, 2005; BARBOSA et al., 2011). Trata-se de uma das cinco maiores culturas produzidas mundialmente e a leguminosa de maior rendimento (FOYER et al., 2016).

A expansão do cultivo da soja no Brasil teve papel fundamental do melhoramento genético, principalmente devido às variações edafoclimáticas entre as regiões brasileiras. A partir do estabelecimento e avanço produtivo na região do Cerrado brasileiro foi que o país se tornou o segundo maior produtor de soja do mundo. E tal avanço ainda passa por elevado crescimento, com a expansão de novas fronteiras agrícolas, como na região denominada por MATOPIBA, que é a junção dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, além do estado do Pará (BEZERRA et al., 2015). Portanto, a solidez do mercado internacional dos produtos do complexo agroindustrial da soja, principalmente destinados à alimentação animal, e a expansão da exploração da cultura, são subsidiados pela geração e oferta de tecnologias (SEDIYAMA, 2009).

Atualmente, os Estados Unidos, Brasil e Argentina são os maiores produtores de soja, sendo responsáveis por 82% da produção mundial (CONAB, 2017). No Brasil, é incontestável o aumento da importância da produção de soja internamente, principalmente devido ao fato de que os Estados Unidos e a Argentina não terão ampla possibilidade para o incremento de áreas produtoras como em solos brasileiros (BEZERRA et al., 2015). Para tal, uma estratégia viável, é o plantio de soja para a recuperação de pastagens degradadas, em que, além de aumentar a área de plantio da cultura, promove a melhoria das áreas de pastejo (MACEDO, 2005). Além, do desenvolvimento de novas cultivares de soja por meio do processo de melhoramento

genético de soja, visando aumentos de produtividade e estabilidade de produção da cultura, bem como ampla adaptabilidade às mais diversas adversidades ambientais regionais (ALMEIDA et al., 1999).

O cultivo de soja é influenciado por diversos fatores ao longo de seu ciclo, sendo relevante destacar a escolha da época de semeadura, como fator cultural que, isoladamente, mais promove o desenvolvimento das plantas e a produção da lavoura (ALBRECHT et al., 2008). O melhoramento genético de soja foi primordial para a expansão da cultura no Cerrado brasileiro, visto que os principais entraves foram as baixas latitudes, a baixa fertilidade do solo e a resposta de duração diurna (SPEHAR, MONTEIRO e ZUFFO, 1993). A quantidade e distribuição da precipitação na região não foram limitantes para o desenvolvimento da soja e a baixa fertilidade do solo é facilmente superada através da adoção de tecnologias de fertilização (SPEHAR, 1994).

A unificação da linguagem utilizada para descrever os estádios fenológicos é um fator primordial para o entendimento e conhecimento da cultura da soja, que é extremamente necessária, com o intuito de eliminar possíveis interpretações subjetivas. A escala mais usual e difundida mundialmente dos estádios fenológicos da soja classifica as fases fenológicas em vegetativa (V) e reprodutiva (R) (Tabela 1) (FEHR e CAVINESS, 1977).

Tabela 1. Estádios fenológicos da cultura da soja.

Estádio	Denominação	Descrição
Estádios vegetativos		
VE	Emergência	cotilédones acima da superfície do solo
VC	Cotilédone	cotilédones completamente abertos
V1	primeiro nó	folhas unifolioladas completamente desenvolvidas
V2	segundo nó	primeira folha trifoliolada completamente desenvolvida
V3	terceiro nó	segunda folha trifoliolada completamente desenvolvida
V4	quarto nó	terceira folha trifoliolada completamente desenvolvida
V5	quinto nó	quarta folha trifoliolada completamente desenvolvida
V6	sexto nó	quinta folha trifoliolada completamente desenvolvida
V...
Vn	enésimo nó	ante-enésima folha trifoliolada completamente desenvolvida
Estádios reprodutivos		
R1	início do florescimento	uma flor aberta em qualquer nó do caule (haste principal)
R2	florescimento pleno	uma flor aberta em um dos dois últimos nós do caule com folha completamente desenvolvida

R3	início da formação da vagem	vagem com 5 mm de comprimento em um dos quatro últimos nós do caule com folha completamente desenvolvida
R4	vagem completamente desenvolvida	vagem com 2 cm de comprimento em um dos quatro últimos nós do caule com folha completamente desenvolvida
R5	início do enchimento dos grãos	grão com 3 mm de comprimento em vagem em um dos quatro últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida
R6	grão cheio ou completo	vagem contendo grãos verdes preenchendo as cavidades da vagem de um dos quatro últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida
R7	início da maturação	uma vagem normal no caule com coloração de madura
R8	maturação plena	95% das vagens maduras

Fonte: Fehr e Caviness (1977).

Entre os estádios vegetativos V3-V5, observa-se o desenvolvimento dos ramos, definição do número de nós até o V5, havendo elevada demanda energética e altas taxas fotossintéticas. Durante o florescimento pleno, no estágio reprodutivo R2, há elevado acúmulo de matéria seca e nutriente, o qual se inicia nas partes vegetativas, deslocando-se gradualmente para as vagens e sementes, ocorre o fim do desenvolvimento, aumento das taxas de fixação de nitrogênio, pleno desenvolvimento radicular, e, se 50% das folhas forem perdidas, implicará na redução de aproximadamente 6% no rendimento da cultura (FEHR e CAVINESS, 1977; FARIAS, NEPOMUCENO e NEUMAIER, 2007; LICHT, WRIGHT e LESSEN, 2013).

2.2 Respostas fisiológicas ao déficit hídrico

Com o fenômeno das mudanças climáticas globais, está previsto para as próximas décadas um aquecimento da superfície terrestre, além de alterações da temperatura são previstos efeitos sobre a precipitação e maior frequência de eventos extremos (ROSE et al., 2016). Estes fatores são os principais causadores de estresses abióticos em plantas, os quais estão associados a perdas significativas na produtividade agrícola mundial. Estresse é tido como todo fator que afeta de forma negativa o desempenho das plantas, diminuindo a sua eficiência biológica e o seu potencial produtivo (BORÉM e RAMALHO, 2011), prejudicando a expressão plena do seu potencial genético de crescimento, desenvolvimento e reprodução (SHAFI-UR-REHMAN, HARRIS e ASHRAF, 2005). Destaca-se que o déficit hídrico é a condição mais limitante para a agricultura,

responsável por ocasionar quedas significativas na produtividade das principais culturas agrícolas (FRACASSO, TRINDADE e AMADUCCI, 2016).

O ácido abscísico (ABA) é o hormônio vegetal ligado à percepção pela planta às adversidades, em que, sob limitação hídrica, é intensificada a sua atuação, desencadeando uma rápida redistribuição e acumulação de ABA nos tecidos vegetais. O ABA é capaz de promover a comunicação entre as raízes e a parte aérea da planta através de sinais químicos sob deficiência hídrica no solo (TUBEROSA, SANGUINETI e LANDI, 1994). Ao ser transportado das raízes para a parte aérea, o ABA induz ao rápido fechamento estomático das folhas, evitando a perda excessiva de água pela transpiração foliar, possibilitando a manutenção os tecidos hidratados e, conseqüentemente, diminui a ocorrência de danos celulares (LIM et al., 2015).

A limitação hídrica severa associada à elevada irradiância promove o recebimento do excesso energético de excitação sobre os fotossistemas das plantas, o que pode ocasionar um estado de “super-redução” dos componentes da cadeia de transporte de elétrons nos cloroplastos e promove a geração de espécies reativas de oxigênio (ROS), potencialmente capazes de danificar o funcionamento normal de uma célula vegetal (DINAKAR, DJILIANOV e BARTELSA, 2012; DAHAL, MARTYN e VANLERBERGHE, 2015; ZHANG et al., 2016). Dentre as ROS, o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e o ânion superóxido (O_2^-) são constantemente produzidas pelo metabolismo vegetal, principalmente sob condições limitantes. Estes são responsáveis por desencadear danos oxidativos aos componentes da maquinaria fotossintética, principalmente promovendo a fotoinibição do fotossistema II (NISHIYAMA e MURATA, 2014; GURURANI, VENKATESH e TRAN, 2015).

Os danos associados à limitação hídrica ocorrem durante todo o ciclo da cultura da soja, sendo responsável pela perda em produtividade de grãos (RAPER e KRAMER, 1987). Entretanto, existe maior sensibilidade durante o estabelecimento das plântulas e no período reprodutivo (LICHT, WRIGHT e LENSSEN, 2013), especificamente durante estádios V3-V4 e V6-R2 (PRINCE et al., 2016).

O déficit hídrico ocasiona diversas alterações fisiológicas na cultura da soja, tanto ao nível metabólico, quanto morfológico, o que requer um ajuste da planta à limitação de recurso. Inicialmente, é observada a diminuição do potencial hídrico foliar, o fechamento

estomático, diminuições nas taxas fotossintéticas, diminuição da partição de biomassa para a parte aérea, promoção do processo de senescência, aumento da abscisão de folhas, flores e frutos, dentre outras alterações (FERRARI, PAZ e SILVA, 2015). Especificamente, o déficit hídrico afeta a síntese e o acúmulo de isoflavonas em sementes de soja. Períodos longos de limitação hídrica, principalmente durante o desenvolvimento dos grãos, promove a diminuição no teor de isoflavonas, o qual é proporcional à intensidade do estresse e dependente do genótipo (GUTIERREZ-GONZALEZ et al., 2010).

Portanto, o déficit hídrico pode ocasionar diversas alterações nas plantas, como quedas no conteúdo de clorofila, biomassa, parâmetros de produtividade e características radiculares (PRINCE et al., 2016), como a diminuição drástica no aprofundamento radicular (VITAL et al., 2017), e nos conteúdos de proteína e óleo (FOROUD et al., 1993). O desempenho fotossintético também é prejudicado, gerando quedas na condutância estomática e taxa fotossintética (LIU et al., 2005), e redução da área foliar específica (NAGASUGA et al., 2014). Alterações no metabolismo do nitrogênio também são observadas sob limitação hídrica, diminuindo a fixação e assimilação deste nutriente pelas raízes (BELLALLOUI et al., 2013).

O déficit hídrico ocasiona alterações no metabolismo do carbono (C) e nitrogênio (N) (PALTA et al., 1994). Com a alteração do metabolismo do C, o déficit hídrico altera a eficiência na conversão de fotoassimilados para o desenvolvimento vegetal, ocasionando modificações na translocação de carboidratos (JORDAN, 1983), além de produzir modificações no padrão de partição de massa seca (KRAMER e BOYER, 1995). A fase de senescência é menos sensível à limitação hídrica, mas, nessas condições, ocorre a translocação de N das folhas mais velhas para regiões de crescimento (ARAÚJO FILHO et al., 2018).

O N exprime papel fundamental no desenvolvimento da cultura da soja, principalmente por participar de processos fisiológicos e por fazer parte da estrutura de proteínas. Portanto, o seu balanço afeta no desempenho fotossintético, produção e translocação de assimilados, na taxa de crescimento foliar e radicular, bem como na produtividade de grãos (KING et al., 2014). Em torno de 94% do N necessário pelas cultivares de soja mais produtivas é fornecido pela fixação biológica de nitrogênio (FBN), o que as possibilita atingir rendimentos acima de 4.000 kg ha⁻¹ (HUNGRIA et al., 2006).

A FBN é fundamental para a viabilidade econômica da cultura no Brasil, mas a limitação hídrica, além de acarretar danos ao metabolismo do carbono, também é capaz de afetar atributos ligados à FBN (CEREZINI et al., 2017).

No cenário produtivo da soja, a grande diversidade climática de cada região produtora, somada ao lançamento de um grande número de cultivares que apresentam diferentes níveis de sensibilidade aos fatores climáticos, estão dificultando o estabelecimento de uma época ideal para todas as cultivares e regiões (URBEN FILHO e SOUZA, 1993).

2.3 Melhoramento genético visando resistência ao déficit hídrico

O incremento na produtividade de grãos é um dos principais e mais importantes objetivos buscados pelos programas de melhoramento genético de soja. Para uma cultivar ser altamente produtiva, deve haver uma combinação balanceada de genes, em que, uma vez atingido este equilíbrio, ganhos adicionais são mais difíceis de serem obtidos (ALMEIDA e KIIHL, 1998). Porém, a produtividade esperada de grãos é influenciada por diversos fatores, tais como a disponibilidade hídrica (RAIJ et al., 1997).

A água é considerada como o principal fator ambiental da regulação do crescimento e desenvolvimento de uma planta, assim, a habilidade para resistir à falta de água é de fundamental importância para a continuidade do seu ciclo de vida (HONG-BO et al., 2008). Em relação aos mecanismos desenvolvidos pelas plantas para a resistência à limitação hídrica, existem três categorias de classificação: *i*) escape ao déficit, que tem um rápido desenvolvimento fenológico; *ii*) evasão ao período de déficit, que elevam o seu potencial hídrico, adiando a desidratação; e *iii*) tolerância ao déficit, que não alteram o potencial hídrico, tolerando à desidratação (TURNER, 1986; 1997). A tolerância à limitação hídrica varia dependendo da cultivar, em que, quanto mais baixo o vigor da semente, maior será a intolerância (SANTOS et al., 2012), além da adoção de práticas agronômicas que possibilitam melhor performance frente ao estresse.

Diversas variações fenotípicas são observadas sob limitação hídrica em soja, principalmente entre os estádios V3-V4 e V6-R2, como no conteúdo de clorofila, redução nos valores de F_v/F_m , biomassa, características radiculares e relacionadas à produtividade

(PRINCE et al., 2016), bem como nos conteúdos de proteína e óleo dos grãos (FOROUD et al., 1993). Ocorre também a diminuição drástica do alongamento radicular (VITAL et al., 2017). Assim, a avaliação da profundidade, distribuição e ramificação do sistema radicular são características que devem ser consideradas na avaliação do nível de tolerância ao déficit hídrico (KRAMER e BOYER, 1995). Quedas na g_s e A foram observadas a partir do oitavo e nono dia de limitação hídrica (LIU et al., 2005), e redução da área foliar específica (NAGASUGA et al., 2014). Em relação ao metabolismo do nitrogênio, a seca ocasiona quedas na fixação e assimilação de nitrogênio em relação a condições hídricas normais (BELLALOUI et al., 2013). Portanto, a determinação do teor de N nas plantas se comporta como um indicador de tolerância e produtividade de grãos sob limitação hídrica, baseando-se no fato de que a fixação biológica deste nutriente é altamente susceptível por esse estresse abiótico (SINCLAIR, 2011).

Para a seleção de genótipos com superioridade agrônômica sob deficiência hídrica é comum o uso de caracteres secundários, por tornar mais preciso o processo de seleção. Por meio desses caracteres, é possível quantificar a influência que a limitação hídrica tem sob a cultura, além de serem observados antes do período de maturação, sendo possibilitado o uso como critério de seleção precoce (BÄNZINGER et al., 2000). Neste caso, dentre os caracteres agrônômicos mais utilizados estão: o intervalo de florescimento, peso de 1000 grãos (RIBAUT e PILET, 1997) e altura da inserção da primeira vagem (GAVA et al., 2015). Bem como as características fisiológicas: peso seco radicular, área foliar específica, teor relativo de clorofila (SONGSRI et al., 2009), condutância estomática (g_s) e taxa fotossintética (A) (GILBERT, ZWIENIECKI e HOLBROOK, 2011), rendimento quântico do fotossistema II (F_v/F_m) (MAXWELL e JOHNSON, 2000) e o acúmulo de solutos, tais como a prolina, que, sob limitação hídrica, media o ajuste osmótico, a integridade e proteção da membrana plasmática, como fonte de carbono e nitrogênio, visando à remoção de ROS (VALLIYODAN e NGUYEN, 2006).

Portanto, para fornecer análises precoces no processo de identificação das plantas com características de interesse, devem ser adotadas técnicas de fenotipagem não invasivas, não destrutivas, que maximizem o tempo de análise, possibilitem a avaliação de um grande número de indivíduos e com alta precisão e exatidão (CHEN et al., 2014). Isto se concretiza no futuro do melhoramento genético, dando ênfase para a fenotipagem

de características fisiológicas específicas e bem definidas (GHANEM, MARROU e SINCLAIR, 2015).

A fenotipagem visa determinar de forma qualitativa ou quantitativa as características fenotípicas pertencentes ao estudo, que se relacionam ao desempenho do genótipo em um determinado ambiente (DHONDT, WUYTS e INZÉ, 2013). As metodologias mais usuais para a avaliação de características fotossintéticas empregam métodos destrutivos que requerem muito tempo, recursos e mão de obra (FURBANK e TESTER, 2011). Portanto, para melhorar a performance do processo de avaliação de genótipos frente à condição estressante, é necessária uma ferramenta acurada, que possibilite a identificação do desempenho produtivo e a capacidade de resiliência das plantas (THIRY et al., 2016). A fenotipagem de alto rendimento busca a caracterização e mensuração de indivíduos (ARAUS et al., 2015), nos quais os caracteres mais promissores em nível de campo devem agregar no tempo e espaço o desempenho da cultura em relação aos recursos capturados e à eficiência no uso dos mesmos pelas plantas (ARAUS et al., 2002; 2008).

Análises estatísticas auxiliam no processo de seleção de genótipos. A estimativa dos parâmetros genéticos, herdabilidade (h^2) e a razão entre o coeficiente de variação genético pelo coeficiente de variação ambiental (CV_g/CV_e), fornecem dados importantes para se determinar a confiabilidade da seleção de genótipos com base em parâmetros fenotípicos (CRUZ, REGAZZI e CARNEIRO, 2012) e é determinante da variância genotípica (CRUZ, 2005). Desta forma, a estimativa dos mesmos determina a confiabilidade do valor fenotípico como indicador do valor genotípico (RAMALHO et al., 2012). Juntos, estas duas características genéticas permitem o conhecimento da variabilidade genética de uma população, o grau de expressão de características, além de gerar ganhos de seleção, pois possibilitam a seleção direta ou indireta (ROCHA et al., 2003).

A h^2 é muito útil ao melhoramento genético, pois possibilita a predição do ganho genético e orientar qual o melhor método de seleção a ser aplicado (RAMALHO, SANTOS e ZIMMERMANN, 1993). Valores desse parâmetro genético acima de 70% indicam que a variabilidade fenotípica presente é predominantemente de origem genética, com efeito fixo e genótipos em homozigose. Já os valores da CV_g/CV_e devem ser superiores à unidade (1,0) (RAMALHO, SANTOS e ZIMMERMANN, 1993),

permitindo a obtenção de ganhos genéticos significativos ao melhoramento genético e à seleção (VENCOVSKY e BARRIGA, 1992; CRUZ, REGAZZI e CARNEIRO, 2012; SOUSA et al., 2013).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Especificações experimentais

O experimento foi conduzido em condições controladas de casa de vegetação, no município de Jerônimo Monteiro, estado do Espírito Santo, Brasil (20° 47' 30,3" de Latitude Sul e 41° 23' 21,8" de Longitude Oeste). Foi empregado o delineamento experimental inteiramente casualizado em esquema fatorial duplo (2 cultivares x 6 regimes hídricos), com quatro repetições, sendo cada parcela experimental constituída por um vaso contendo uma planta de cada genótipo. Os genótipos de soja utilizados foram as cultivares MG/BR 46 (Conquista), cuja capacidade de tolerar ao déficit hídrico é conhecida (CASAGRANDE et al., 2001), e Vtorial IPRO, que é uma cultivar moderna.

Os tratamentos empregados foram: T1: controle (condições hídricas normais); T2: déficit hídrico (DH) imposto no estágio V4; T3: DH imposto no estágio R2; T4: DH imposto no estágio R5; T5: DH imposto nos estádios V4 e R2; T6: DH imposto nos estádios V4 e R5. A limitação hídrica imposta às plantas foi imposta gradativamente, com base na capacidade de campo (CC) do tratamento controle. A cada dois dias, foi retirado 15% da CC, até se atingir 60%, permanecendo esta limitação até as plantas atingirem o ponto de murcha fisiológico. No dia seguinte, foi procedida a fenotipagem, com posterior retomada das condições hídricas normais.

Foram semeadas, em 13 de dezembro de 2018, cinco sementes de cada genótipo em vasos de 5 L preenchidos com solo, substrato comercial (Vivatto PRO 20[®] – Technes) e areia, na proporção (3:1:1). O manejo da adubação do solo empregado foi 18 g de 04-14-08 vaso⁻¹ (0-20 cm) na semeadura, 0,66 g de KCl vaso⁻¹ em cobertura (35 dias após a emergência das plantas – DAE) e 4 L ha⁻¹ de NHT[®] Magnésio, com diluição em 100 L ha⁻¹ de água, aplicado via solo no início do período de florescimento. Foi utilizado solo com textura argilosa, com frações granulométricas de 51% de areia, 3% de silte e 46% de argila. A análise química do solo revelou pH (CaCl₂) = 6,62; P = 129,47 mg dm⁻³; K = 672,00 mg dm⁻³; Na = 42,00 mg dm⁻³; Ca = 2,57 cmolc dm⁻³; Mg = 0,84 cmolc dm⁻³; H + Al = 2,47 cmolc dm⁻³; t = 5,32 cmolc dm⁻³; T = 7,79; soma de bases (SB) = 5,32 cmolc dm⁻³; V = 68,25 %; Al = 0,00 cmolc dm⁻³.

O desbaste foi feito 15 dias após a emergência das plantas, permanecendo-se uma planta por vaso. As plantas foram conduzidas sob condições hídricas normais até a

imposição dos ciclos de déficit hídrico (tratamentos) ao longo do desenvolvimento da cultura.

O monitoramento das variáveis meteorológicas do ambiente de cultivo foi realizado por meio de sensores dispostos no interior da casa de vegetação. Para o monitoramento preciso do consumo hídrico pelas plantas, foram adicionados discos de isopor sobre o solo, a fim de impedir a perda d'água por evaporação e medir somente a transpiração. O centro do isopor possuía um furo com três centímetros de diâmetro e um corte entre a borda e o centro, de forma a permitir seu encaixe ou remoção dentro do vaso com a planta, e da aplicação d'água de irrigação. Os espaços que não ficaram cobertos com o isopor, como a parte do furo, foram preenchidos com serragem.

A determinação da transpiração real (T_r) foi feita por meio de lisímetros de pesagem (Figura 1), constituídos por um conjunto de 19 balanças (modelo 9098, Toledo Prix, São Bernardo do Campo-SP), com capacidade individual para 60 kg e sensibilidade de 10 g. Cada balança se comunicava com um software supervisor, responsável pela leitura e armazenamento dos pesos de todas as balanças a cada cinco minutos. A partir da diferença entre os pesos no tempo foi possível calcular a transpiração, sendo a transpiração diária obtida pela diferença de pesos nos horários das 06h00min e 18h00min.



Figura 1. Conjuntos de lisímetros de pesagem. A: vaso de 5L preenchido com solo coberto com serragem e disco de isopor, e planta de soja; B: disposição dos vasos em balanças de precisão.

Em cada balança foram adicionados os vasos das quatro repetições dos tratamentos avaliados. Na 19ª balança também foram adicionados quatro vasos preenchidos com o mesmo volume de solo, cobertos com isopor e serragem, mas sem planta. Desta forma, foi realizado o monitoramento da perda de água por evaporação do solo, sendo esses valores subtraídos das demais unidades experimentais.

O manejo de pragas foi realizado a partir do controle químico de mosca branca (*Bemisia tabaci*) nos estádios fenológicos R2, R5 e R7, utilizando tiametoxam, com a dose do produto comercial de 150 g ha⁻¹. E deltametrina, com a dose do produto comercial de 300 mL ha⁻¹, como prevenção de lagartas e percevejos.

3.2. Fenotipagem e análises estatísticas

Para a fenotipagem das plantas de soja foram utilizados caracteres agronômicos e características fisiológicas.

3.2.1. Caracteres agronômicos

A avaliação dos caracteres agronômicos foi realizada quando as plantas atingiram o estágio fenológico R8 (FEHR e CAVINESS, 1977) (90 DAS), os quais expressam o desempenho agronômico das plantas. Os mesmos estão apresentados a seguir:

Altura da planta na maturidade (APM - cm): é a medida, em centímetros, a partir do colo da planta até a extremidade da haste principal;

Altura de inserção da primeira vagem (AIPV - cm): é a medida, em centímetros, a partir do colo da planta até a inserção da primeira vagem da planta;

Número de vagens por planta (NVPP - un): é a contagem do número de vagens contidas em cada planta;

Número de grãos por vagem (NGPV - un): é a contagem do número de grãos completamente formados em cada vagem, obtendo-se a média por planta;

Peso de mil grãos (PMG - g): é a pesagem de uma amostra de 100 grãos de cada planta, aferido em balança de precisão em gramas, com posterior multiplicação por 10, para expressar o valor de mil grãos;

Índice de colheita (IC - %): foi obtido através da equação apresentada abaixo, onde o rendimento biológico, que é a matéria seca da parte aérea (caule, vagens e grãos) (COLASANTE e COSTA, 1981).

$$IC = \frac{\text{Rendimento de grãos}}{\text{Rendimento biológico}} \times 100$$

Produtividade de grãos (PROD – kg ha⁻¹): a produtividade de grãos de soja foi estimada tomando quatro componentes de rendimento, os quais são responsáveis pela produtividade, sendo eles o número de plantas por área (NPPA), número de vagens por planta (NVPP), número de grãos por vagem (NGPV) e o peso de mil grãos (PMG). Foi adotada uma população de 267 mil plantas ha⁻¹ (NPPA = 267), o que é obtido a partir do espaçamento entre linhas de 0,45 cm. E então, foi empregada a fórmula a seguir, em que a produtividade de grãos de soja foi expressa sem sacos por hectare (sc ha⁻¹) (SILVA, 2015). Posteriormente, os dados foram multiplicados por 60, para serem expressos em kg ha⁻¹:

$$\text{Prod} = \frac{\text{NPPA} \times \text{NVPP} \times \text{NGPV} \times \text{PMG}}{60000}$$

3.2.2. Características fisiológicas

Trocas gasosas: as avaliações foram realizadas no dia seguinte em que as plantas atingiram o ponto de murcha fisiológico, após a aplicação dos tratamentos de déficit hídrico e também nas plantas controle, procedendo-se em uma folha dos dois últimos folíolos completamente expandidos. Nos dias de avaliações a temperatura média e a umidade relativa do ar foram em torno de 31 °C e 60%, respectivamente. Os parâmetros de trocas gasosas, taxa fotossintética líquida (A - $\mu\text{mol mmol}^{-1}$), condutância estomática (g_s - $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e a eficiência fotoquímica efetiva (F_v'/F_m') foram medidos as 08:00 em sistema aberto, sob radiação fotossinteticamente ativa (RFA) equivalente à do ambiente ($1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e pressão parcial de CO_2 de 400 Pa, com um analisador de gases infravermelho (Li 6400XT, Li-Cor, Lincon, EUA) com fluorômetro acoplado.

Foram determinados o coeficiente fotoquímico (qL - $\mu\text{mol mol}^{-1}$), o qual foi obtido a partir da função a seguir $qL = (F_m' - F_s)/(F_m' - F_o') \cdot (F_o'/F_s)$; a eficiência instantânea de uso da água (A/E , $\mu\text{mol mol}^{-1}$); e eficiência intrínseca de uso da água (A/g_s , $\mu\text{mol mmol}^{-1}$).

Rendimento quântico máximo do fotossistema II (F_v/F_m): a avaliação foi realizada, entre 08:00 e 10:00, no momento em que as plantas atingiram o estágio fenológico R7. A relação portátil F_v/F_m foi determinada utilizando fluorômetro portátil (Marca: Fluorpen, Modelo: FP-100) por meio da função a seguir $F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$. Para tal, foram amostradas uma folha dos dois últimos folíolos completamente expandidos, as quais foram adaptadas ao escuro durante 30 minutos, para que todos os aceptores primários de elétrons pudessem estar oxidados. Após esse período, cada folha foi exposta a um pulso saturante de luz de $3.000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, que é liberado pelo equipamento.

Índice de clorofila (CL), flavonoides (FLAV), antocianinas (ANT) e balanço interno de nitrogênio (BIN): a avaliação foi realizada no dia seguinte em que as plantas atingiram o PMP, após cada ciclo de déficit hídrico, procedendo-se em uma folha dos dois últimos folíolos completamente expandidos. As medidas utilizando o equipamento Dualex® (Force-A, Orsay, France) foram realizadas as 08h. Sendo que o BIN é obtido a partir da razão CL/FLAV.

Massa seca da parte aérea (MSPA - g): a coleta foi realizada no estágio fenológico R8. As amostras foram dispostas em sacos de papel e secas em estufa com circulação forçada

de ar a 65°C durante 24 h. Em seguida, o material foi pesado em balança de precisão (g), para a determinação da matéria seca.

Comprimento radicular (CR - cm): a coleta foi realizada no estádio fenológico R8. Após a limpeza em água corrente sob peneira, procedeu-se à medição, em cm, do sistema radicular, desde o hipocótilo até a máxima extremidade inferior.

Massa seca radicular (MSR - g): após a medição do comprimento radicular, as amostras de raízes foram dispostas em sacos de papel e secas em estufa com circulação forçada de ar a 65° C durante 72 h. Em seguida, o material foi pesado em balança de precisão (g), para a determinação da massa seca.

Fração de matéria da parte aérea (FMPA): obtida a partir da razão entre a MSPA e a matéria seca total ($MST = MSPA + MSR$).

Fração de matéria radicular (FMR): obtida a partir da razão entre a MSR e a MST.

Transpiração real (Tr - L): foi obtida a partir da soma dos valores da perda de água transpirada diariamente subtraindo o valor da evaporação dos vasos sem plantas.

Eficiência agrônômica de uso da água (EUA – L g-1): foi obtida a partir da razão entre a Tr e o rendimento de grãos (RG).

Eficiência de transpiração (TE – g L⁻¹): foi obtida a partir da razão entre a MSPA (caule, vagens e grãos) e a Tr.

3.2.3. Análises estatísticas

Para avaliar a variabilidade dos parâmetros fenotípicos foi realizada a análise de variância, empregando-se o Teste F, a 0,05 de probabilidade e o teste de comparação de médias de Scott e Knott, a 0,05 de probabilidade, para cada parâmetro. Também foram estimados os parâmetros genéticos coeficiente de variação ambiental (CV_e), herdabilidade (h^2) e razão entre o coeficiente de variação genotípico e o ambiental (CV_g/CV_e).

Para a identificação dos parâmetros fenotípicos de maior contribuição para a variabilidade encontrada nas condições experimentais, foi realizada a análise de importância de caracteres (CRUZ, 2013). Portanto, os mesmos foram selecionados com base na contribuição dos parâmetros para diversidade (SINGH, 1981), utilizando

distância generalizada de Mahalanobis. Posteriormente, foi realizada a avaliação da relação entre estes parâmetros fenotípicos, em que foi estimado o coeficiente de correlação fenotípico. E, posteriormente, procedeu-se à análise de trilha.

Para a realização da análise de trilha foram selecionadas uma característica principal (PROD) e sete características expectativas (IC, A, E, Tr, EUA, CL e ANT). Foi estimado o coeficiente de correlação de Pearson (STELL et al., 1997), entre as oito características avaliadas. Antes de se realizar a análise de trilha, a matriz de correlação fenotípica foi testada, quanto à multicolinearidade, pelo número de condição da matriz (NC), proposto por Montgomery e Peck (1981), que consiste na razão do maior pelo menor autovalor da matriz. Em presença de multicolinearidade moderada ($100 < NC < 1000$), ou severa ($NC > 1000$), os coeficientes de caminhamento estimados não são confiáveis, em função das elevadas variâncias associadas aos seus estimadores (CARVALHO e CRUZ, 1996). No entanto, em presença de multicolinearidade fraca ($NC < 100$), não há problemas quanto à confiabilidade dos coeficientes de caminhamento. Sobre a matriz das correlações entre as oito características, procedeu-se ao diagnóstico de multicolinearidade, pelo número de condição (NC), proposto por Montgomery e Peck (1981). Em seguida, as correlações das demais variáveis e a variável PE (variável dependente) foram desdobradas em efeitos diretos e indiretos, pela análise de trilha, com uma cadeia, estabelecendo-se as relações de causa e efeito entre as características, conforme descrito por Cruz, Regazzi e Carneiro (2004).

Contudo, com a constatação de multicolinearidade severa ($NC > 1000$), realizou-se a análise de regressão em crista, ou a análise de trilha sob multicolinearidade, proposta por Carvalho (1994), com as variáveis, em que, utiliza-se uma constante k, cujo valor deve ser o menor possível, para estabilizar os coeficientes de trilha e manter o fator de inflação da variância (VIF) menor que 10, em todas as variáveis explicativas (CRUZ e CARNEIRO, 2006; RIOS et al., 2012).

As análises foram realizadas com auxílio dos programas computacionais Genes 1990.2019.28 (CRUZ, 2013) e RBio (BHERING, 2017).

4 RESULTADOS

Como o estudo do déficit hídrico deve eliminar os efeitos de quaisquer outros fatores abióticos e bióticos, estes foram mantidos adequados para o desenvolvimento da cultura no presente estudo. O monitoramento das variáveis meteorológicas do ambiente de cultivo foi realizado por meio de sensores dispostos no interior da casa de vegetação, em que a variação das mesmas ao longo do período de duração do experimento está apresentada na Figura 2.

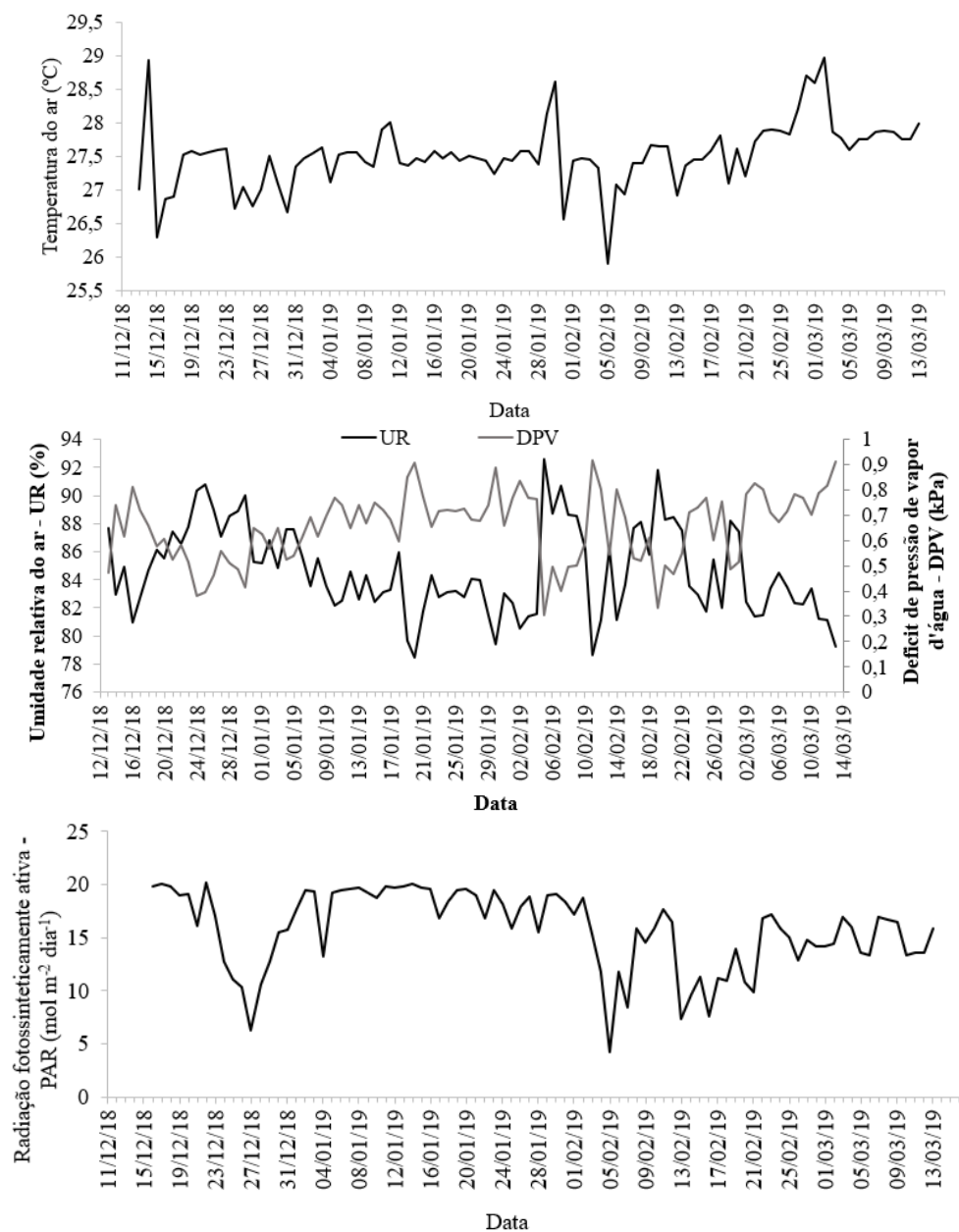


Figura 2: Variáveis meteorológicas temperatura do ar (T - °C), umidade relativa do ar (UR - %) e déficit de pressão de vapor de água (DPV - kPa), e radiação

fotossinteticamente ativa ($PAR - mol\ m^{-2}\ dia^{-1}$), ao longo da duração do experimento sob condições de casa de vegetação.

Foi procedida a caracterização do solo utilizando-se uma sonda TDR, com a avaliação realizada no dia da fenotipagem, em que foram utilizados os parâmetros de solo teor volumétrico de água (VWC) e déficit de água (DEF) (Tabela 2). Foi realizada a média dos dados obtidos às 08h, 12h e 16h. Verifica-se a queda drástica do teor volumétrico de água presente no solo e um incremento muito grande no déficit de água após a aplicação do déficit hídrico.

Tabela 2. Parâmetros de solos medidos no substrato dos lisímetros de pesagem.

Tratamentos	Teor volumétrico de água (VWC - %)	Déficit de água (DEF - mm)
Controle	24,00	36,46
DH V4	5,86	58,63
DH R2	6,36	76,40
DH R5	2,26	70,23
DH V4 e R2	6,46	71,83
DH V4 e R5	5,76	72,86

Legenda: controle: condições hídricas normais; DH V4: déficit hídrico imposto no estágio fenológico V4; DH R2: déficit hídrico imposto no estágio fenológico R2; DH R5: déficit hídrico imposto no estágio fenológico R5; DH V4/R2: déficit hídrico imposto nos estádios fenológicos V4 e R2; DH V4/R5: déficit hídrico imposto nos estádios fenológicos V4 e R5.

A Figura 3 mostra a parte aérea e o sistema radicular na maturidade fisiológica, estágio fenológico R8, de uma planta da cultivar MG/BR 46 (Conquista) e da Vetorial IPRO cultivada sob condições hídricas normais (controle).



Figura 3. Parte aérea e sistema radicular da planta no estágio R8 da cultivar MG/BR 46 (Conquista) (A) e Vetorial IPRO (B), cultivada sob condições hídricas normais.

A capacidade de resiliência ao déficit hídrico das plantas das cultivares estudadas pode ser visualmente verificada na análise das figuras a seguir. Serão apresentadas fotos das duas cultivares com a imposição dos tratamentos de deficiência hídrica. As mesmas foram retiradas de uma planta antes da imposição da limitação hídrica; no dia da fenotipagem, ao atingir o ponto de murcha fisiológico; no dia seguinte, após serem reidratadas; e da parte aérea e do sistema radicular na maturidade fisiológica.

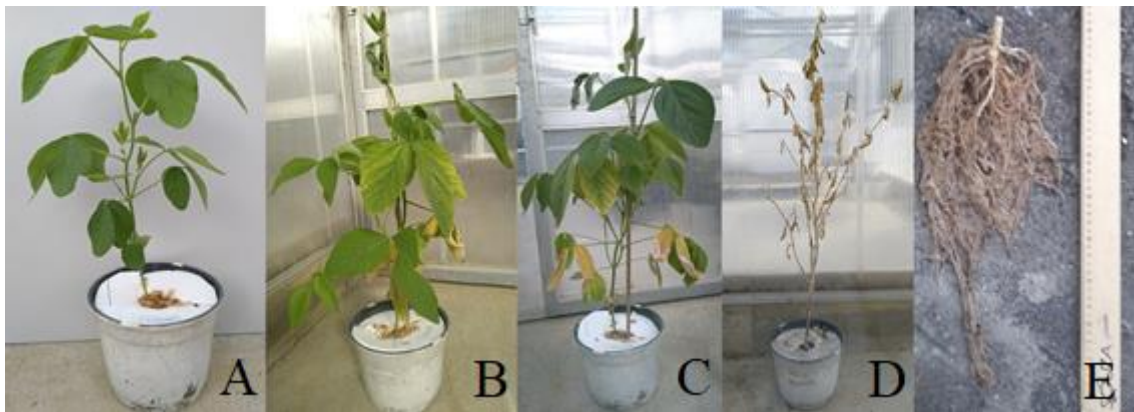


Figura 4. Planta da cultivar MG/BR 46 (Conquista), com imposição de limitação hídrica no estágio V4: antes (A), após o déficit (B) e depois da reidratação (C), e parte aérea (D) e sistema radicular (E) no estágio R8.



Figura 5. Planta da cultivar Vtorial IPRO, com imposição de limitação hídrica no estágio V4: antes (A), após o déficit (B) e depois da reidratação (C), e parte aérea (D) e sistema radicular (E) no estágio R8.

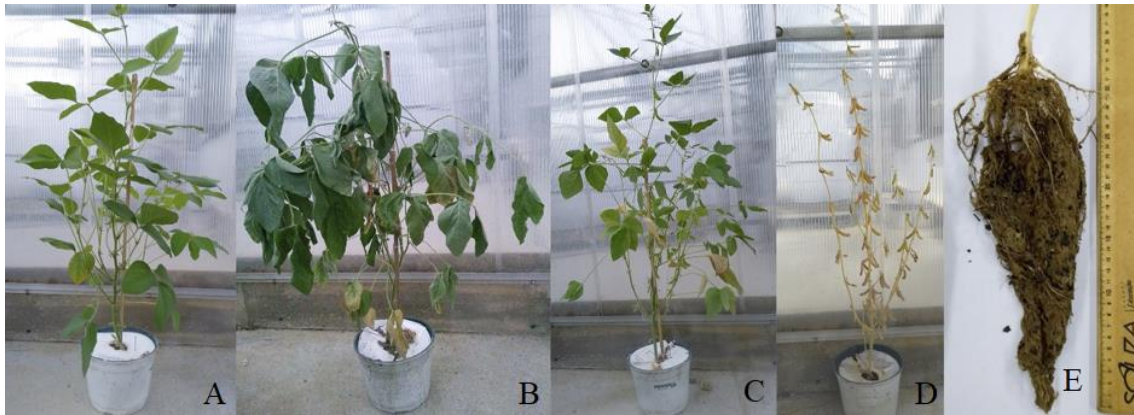


Figura 6. Planta da cultivar MG/BR 46 (Conquista), com imposição de limitação hídrica no estágio R2: antes (A), após o déficit (B) e depois da reidratação (C), e parte aérea (D) e sistema radicular (E) no estágio R8.

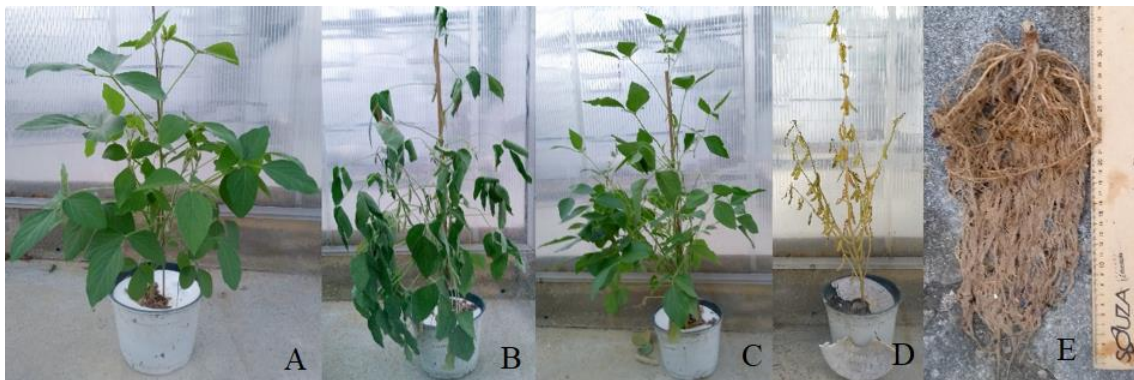


Figura 7. Planta da cultivar Vtorial IPRO, com imposição de limitação hídrica no estágio R2: antes (A), após o déficit (B) e depois da reidratação (C), e parte aérea (D) e sistema radicular (E) no estágio R8.

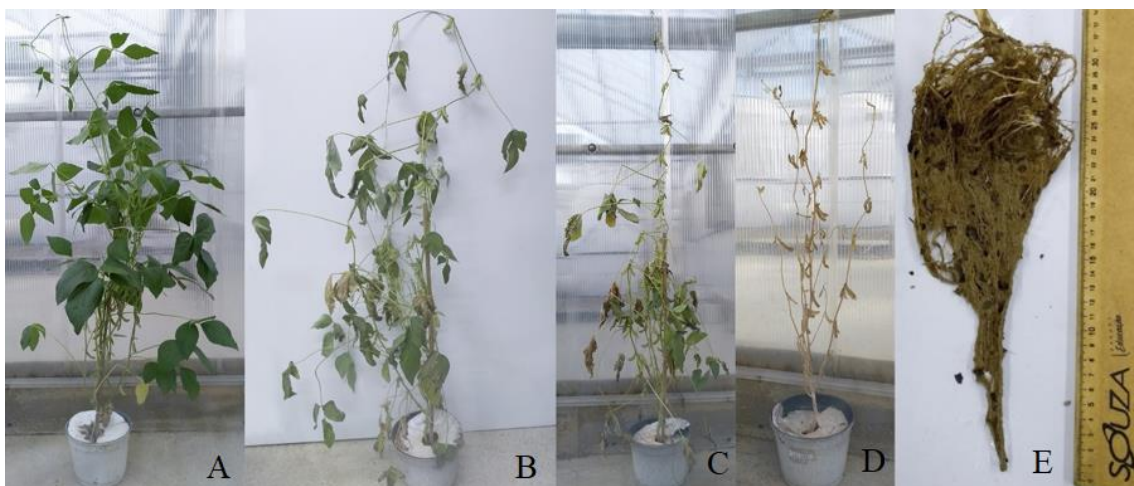


Figura 8. Planta da cultivar MG/BR 46 (Conquista), com imposição de limitação hídrica no estágio R5: antes (A), após o déficit (B) e depois da reidratação (C), e parte aérea (D) e sistema radicular (E) no estágio R8.



Figura 9. Planta da cultivar Vtorial IPRO, com imposição de limitação hídrica no estágio R5: antes (A), após o déficit (B) e depois da reidratação (C) e parte aérea (D) e sistema radicular (E) no estágio R8.

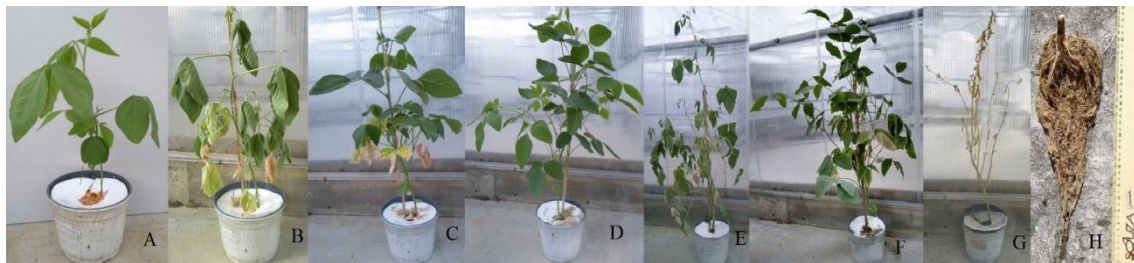


Figura 10. Planta da cultivar MG/BR 46 (Conquista), com imposição de limitação hídrica nos estádios V4 e R2: V4: antes (A), após o déficit (B) e depois da reidratação (C), e no R2: antes D, após o déficit (E) e depois da reidratação (F), e parte aérea (G) e sistema radicular (H) no estágio R8.



Figura 11. Planta da cultivar Vtorial IPRO, com imposição de limitação hídrica nos estádios V4 e R2: V4: antes (A), após o déficit (B) e depois da reidratação (C), e no R2: antes D, após o déficit (E) e depois da reidratação (F), e parte aérea (G) e sistema radicular (H) no estágio R8.



Figura 12. Planta da cultivar MG/BR 46 (Conquista), com imposição de limitação hídrica nos estádios V4 e R5; V4: antes (A), após o déficit (B) e depois da reidratação (C), e no R5: antes D, após o déficit (E) e depois da reidratação (F), e parte aérea (G) e sistema radicular (H) no estágio R8.



Figura 13. Planta da cultivar Vtorial IPRO, com imposição de limitação hídrica nos estádios V4 e R5; V4: antes (A), após o déficit (B) e depois da reidratação (C), e no R5: antes D, após o déficit (E) e depois da reidratação (F), e parte aérea (G) e sistema radicular (H) no estágio R8.

Caracteres agronômicos

As plantas da cultivar Vtorial IPRO demonstraram maior altura na maturidade fisiológica (APM – Tabela 3) em relação às da MG/BR 46 Conquista, sendo 130,75 cm e 111,00 cm sob condições hídricas normais. Porém, quando o déficit hídrico (DH) foi submetido nos estádios R2 e V4/R2, as plantas da cultivar MG/BR 46 Conquista apresentaram um crescimento maior. A análise dentro de cada cultivar mostrou que o DH influi pouco em relação à altura das plantas para a cultivar MG/BR 46 Conquista, visto que, não houve diferenças significativas entre os tratamentos. Isto demonstra a sua capacidade de resistência frente à limitação hídrica. Já para a cultivar Vtorial IPRO, o DH ocasiona uma variação, em que o maior impacto observado foi no florescimento e quando o DH foi imposto concomitantemente nos estádios V4 e R2. Esse parâmetro fenotípico pode ser implementado em programas para seleção de genótipos de soja superiores para resistência ao déficit hídrico, por apresentarem elevadas herdabilidade (h^2 90,12) e razão entre os coeficientes de variação genotípico e ambiental (CV_g/CV_e 1,07), foram elevados.

Tabela 3. Médias dos caracteres agronômicos avaliados em duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes hídricos.

Tratamentos	APM (cm)		AIPV (cm)		NVPP	
	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO
Controle	111,00 Ba	130,75 Aa	19,50 Ab	9,25 Ba	53,50 a	53,75 a
DH V4	109,25 Ba	115,50 Ab	21,75 Aa	8,50 Ba	49,25 b	46,50 b
DH R2	101,50 Aa	99,50 Bc	18,50 Ab	9,75 Ba	43,75 c	46,25 b
DH R5	112,00 Ba	113,25 Ab	19,25 Ab	9,00 Ba	42,25 c	43,00 c
DH V4 e R2	103,50 Aa	101,00 Bc	22,25 Aa	8,25 Ba	41,50 c	43,00 c
DH V4 e R5	102,50 Ba	117,50 Ab	21,00 Aa	9,00 Ba	39,25 d	41,25 c
CV (%)	6,06		9,2		3,57	
h^2	90,12		14,71		98,42	

	1,07		0,15		2,79	
	NGPV		PCG (g)		IC	
Tratamentos	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO
Controle	2,31 Ba	2,46 Aa	9,33 Aa	9,91 Aa	47,75 Aa	47,92 Aa
DH V4	2,21 Bb	2,42 Aa	7,77 Ab	7,80 Ac	38,15 Ab	34,11 Ab
DH R2	2,20 Bb	2,34 Ab	7,47 Ab	7,61 Ac	41,36 Ab	28,50 Bb
DH R5	2,10 Ac	2,14 Bd	6,99 Ab	7,05 Ac	29,07 Ac	24,41 Ab
DH V4 e R2	2,01 Bd	2,27 Ac	7,05 Bb	8,98 Ab	54,33 Aa	30,65 Bb
DH V4 e R5	1,98 Bd	2,12 Ad	5,79 Bc	7,31 Ac	24,61 Ac	24,41 Ab
CV (%)	2,43		5,99		17,31	
h ²	97,79		97,58		94,11	
CV _g /CV _e	2,35		2,24		1,41	

	PROD (kg ha ⁻¹)	
Tratamentos	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO
Controle	3070,81 Ba	3509,90 Aa
DH V4	2244,76 Ab	2167,40 Ab
DH R2	1832,54 Ac	1963,24 Ad
DH R5	1453,32 Bd	1719,22 Ae
DH V4 e R2	1735,84 Bc	2387,20 Ab
DH V4 e R5	1311,65 Bd	2044,02 Ad
CV (%)	6,03	
h ²	99,46	
CV _g /CV _e	4,81	

Médias seguidas com letras minúsculas iguais na coluna e/ou letras maiúsculas iguais na linha não diferem entre si pelo teste de Scott e Knott, a 0,05 de probabilidade. Legenda: APM: altura da planta na maturidade, AIPV: altura de inserção da primeira vagem, NVPP: número de vagens por planta, NGPV: número de grãos por vagem, PCG: peso de cem grãos, IC: índice de colheita e PROD: produtividade de grãos.

As plantas da cultivar MG/BR 46 Conquista apresentaram maior altura de inserção da primeira vagem (AIPV) (Tabela 3) em relação à Vtorial IPRO para todos os regimes hídricos submetidos. Entre os mesmos, houve variação para a primeira e não houve para a segunda. A variação apresentada pela cultivar MG/BR 46 Conquista demonstrou que a imposição do DH no V4 propicia uma capacidade de resiliência das plantas para esse caractere agrônômico. Visto que, ao impor o déficit hídrico no florescimento e no enchimento de grãos, não houve alterações significativas. Porém, esse caractere não apresentou grande relevância para ser aplicado em programas de melhoramento, pois os parâmetros genéticos estimados foram muito baixos.

O caractere agrônômico número de vagens por planta (NVPP) (Tabela 3) apresentou parâmetros genéticos muito elevados, h² de 98,42 e CV_g/CV_e de 2,79. Não foi constatada diferença significativa na análise entre as duas cultivares. O maior impacto

observado na cultivar MG/BR 46 Conquista foi quando a limitação hídrica foi imposta no V4 concomitantemente no R5. E para a Vtorial IPRO ao impor o DH no R5, V4/R2 e V4/R5.

As plantas da cultivar Vtorial IPRO apresentaram maior número de grãos por vagem (NGPV) (Tabela 3) que a MG/BR 46 Conquista, exceto quando o DH foi imposto no enchimento de grãos, estágio fenológico que ocasionou maior impacto para essa cultivar entre os tratamentos impostos. Já para a Vtorial IPRO, a limitação hídrica imposta no V4/R2 acarretou maior diminuição para esse caractere. Este caractere agronômico também apresentou parâmetros genéticos de elevada magnitude (h^2 97,79 e CV_g/CV_e 2,35).

Ao avaliar o impacto dos tratamentos com DH para o peso de cem grãos (PCG) (Tabela 3), observa-se que as duas cultivares apresentaram desempenho similar. O PCG foi maior para a cultivar Vtorial IPRO apenas quando o DH foi submetido simultaneamente entre os estádios V4/R2 e V4/R5. O maior decréscimo para esse caractere foi avaliado no tratamento em que o DH foi imposto no V4/R5 para a cultivar MG/BR 46 Conquista. E o menor impacto produtivo dos tratamentos com limitação hídrica na Vtorial IPRO, para o PCG, foi aferido no V4/R2. Fato esse, que evidencia a sua capacidade de produzir grãos mais pesados mesmo após receber menos água durante o seu desenvolvimento inicial. Os valores estimados de h^2 e o CV_g/CV_e foram altos para esse caractere agronômico, 97,58 e 2,24 respectivamente.

Para a estimativa do índice de colheita (IC) (Tabela 3), as duas cultivares tiveram resultados estatisticamente semelhantes. Exceto para os tratamentos em que o DH foi imposto no florescimento na cultivar Vtorial IPRO, os quais ocasionaram uma diferenciação negativa para essa cultivar em relação à MG/BR 46 Conquista. Ao analisar separadamente os dados dos tratamentos para cada cultivar, é verificado que o DH imposto nos tratamentos V4 e V4/R5 provocaram maior impacto para a MG/BR 46 Conquista. E, para a Vtorial IPRO, não foi possível verificar diferenças significativas entre os tratamentos com deficiência hídrica. Foi constatada herdabilidade de 94,11 e razão CV_g/CV_e de 1,41, valores com alta magnitude.

Nas condições experimentais do presente estudo, a produtividade de grãos (PROD – Tabela 3) apresentou os maiores valores para os dois parâmetros genéticos estimados, entre os caracteres agronômicos, h^2 de 99,46 e razão CV_g/CV_e de 4,81. Foi constatada

altíssima herdabilidade (99,44) e elevada razão CV_g/CV_e (4,81). A análise da PROD entre as cultivares avaliadas permitiu verificar o desempenho produtivo estatisticamente superior da cultivar Vtorial IPRO em relação à MG/BR 46 Conquista. Com exceção quando o DH foi imposto no V4 e R2, períodos que igualou a performance agrônômica de ambas. Houve grande variação entre os tratamentos dentro de cada cultivar. O maior impacto produtivo do déficit hídrico na cultivar MG/BR 46 Conquista foi observado nos tratamentos com DH no R5 (1453,32 kg ha⁻¹: 52,68% a menos que o controle) e V4/R5 (1311,65 kg ha⁻¹: 57,29% a menos que o controle). E no enchimento de grãos para a Vtorial IPRO (1779,22 kg ha⁻¹: 51,02% a menos que o controle).

Características fisiológicas

A taxa fotossintética líquida (*A*) (Tabela 4) sob condições hídricas normais e quando o DH foi imposto no estágio V4 foram estatisticamente superiores nas plantas da cultivar MG/BR 46 Conquista em relação à Vtorial IPRO. Já para os demais tratamentos, o desempenho fotossintético de ambas foi estatisticamente igual. Em uma avaliação global dos dados, verifica-se que o déficit hídrico ocasiona grande impacto na *A* de plantas de soja. Isto, ao se comparar os dados das plantas controle com os dos tratamentos de limitação hídrica. Ao analisar os dados da cultivar MG/BR 46 Conquista, verifica-se que houve um impacto semelhante ao submeter o DH nas plantas no V4 e R2, e mais severo nos tratamentos com DH no R5, V4/R2 e V4/R5. E para a cultivar Vtorial IPRO, a variação da *A* foi semelhante nos estádios V4 e V4/R5, com maior decréscimo no R2, R5 e V4/R5. Foi constatado que o DH ocasiona maior decréscimo na *A* no período de enchimento de grãos. Analisando-se os parâmetros genéticos estimados, foi verificada alta herdabilidade (98,54) e alta relação CV_g/CV_e (2,9).

Tabela 4. Médias de características fisiológicas avaliadas em de duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes hídricos.

Tratamentos	<i>A</i> (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)		<i>g_s</i> (mol m ⁻² s ⁻¹)		<i>q_L</i>	
	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO
Controle	25,15 Aa	19,36 Ba	0,382 a	0,397 a	0,899 a	0,874 a
DH V4	14,18 Ab	1,52 Bc	0,166 b	0,094 b	0,701 a	0,684 b
DH R2	11,31 Ab	9,61 Ab	0,262 b	0,172 b	0,925 a	0,894 a
DH R5	4,21 Ac	6,58 Ab	0,080 b	0,077 b	0,566 a	0,457 c
DH V4 e R2	6,89 Ac	7,15 Ab	0,071 b	0,078 b	0,817 a	0,845 a

DH V4 e R5	4,98 Ac	3,63 Ac	0,062 b	0,058 b	0,311 a	0,285 d
CV (%)	23,53		61,56		14,55	
h ²	98,54		93,94		98,1	
CV _g /CV _e	2,9		1,39		2,54	
	<i>F_v'/F_m'</i>		<i>F_v/F_m</i>			
Tratamentos	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO		
Controle	0,590 Aa	0,488 Ba	0,80 Ba	0,82 Aa		
DH V4	0,583 Aa	0,386 Bb	0,78 Bb	0,82 Aa		
DH R2	0,537 Aa	0,493 Aa	0,74 Bc	0,80 Aa		
DH R5	0,537 Aa	0,488 Aa	0,66 Bd	0,77 Ab		
DH V4 e R2	0,435 Ab	0,474 Aa	0,78 Bb	0,81 Aa		
DH V4 e R5	0,511 Aa	0,522 Aa	0,78 Bb	0,82 Aa		
CV (%)	11,48		1,82			
h ²	52,26		97,97			
CV _g /CV _e	0,36		2,46			

Médias seguidas com letras minúsculas iguais na coluna e/ou letras maiúsculas iguais na linha não diferem entre si pelo teste de Scott e Knott, a 0,05 de probabilidade. Legenda: A: taxa fotossintética líquida, g_s : condutância estomática, q_L : coeficiente fotoquímico, F_v'/F_m' : eficiência fotoquímica efetiva e F_v/F_m : rendimento quântico do fotossistema II.

Não houve diferença estatística entre as duas cultivares para a condutância estomática (g_s) (Tabela 4). Verificou-se que o DH ocasiona decréscimos nesta característica, com efeito estatisticamente semelhante para as duas cultivares. A h^2 e CV_g/CV_e foram altos, 93,94 e 1,39 respectivamente.

A análise dos dados do coeficiente fotoquímico (q_L) (Tabela 4) exprime um comportamento estatisticamente igual para as duas cultivares. E, para a MG/BR 46 Conquista, não houve diferença estatística entre os tratamentos. Já para a Vtorial IPRO, verificou-se um maior decréscimo nesta característica no enchimento de grãos e, maior ainda, quando o DH foi imposto simultaneamente no V4 e R5. Foi estimada alta h^2 (98,10) e alta relação CV_g/CV_e (2,54), possibilitando o emprego dessa característica para a seleção de genótipos superiores para as presentes condições experimentais.

Os resultados da eficiência fotoquímica efetiva (F_v'/F_m') (Tabela 4) exprimi valores estatisticamente superiores para a cultivar MG/BR 46 Conquista em relação à Vtorial IPRO sob condições hídricas normais e quando o DH foi imposto no V4. E, nos demais tratamentos, o desempenho das duas cultivares foi estatisticamente igual. Para a primeira cultivar, essa característica foi estatisticamente semelhante entre os tratamentos, exceto ao impor o DH no V4/R2. Comportamento diferente ocorreu para a Vtorial IPRO,

em que o maior impacto do DH foi verificado no V4. Porém, os dados dos parâmetros genéticos foram muito baixos (h^2 52,26 e CV_g/CV_e 0,36), não garantindo confiabilidade para ser empregada em programas de melhoramento de soja para resistência ao déficit hídrico.

A característica rendimento quântico do fotossistema II (F_v/F_m) (Tabela 4) exprime que a cultivar Vtorial IPRO tem maior capacidade de resiliência em relação ao DH do que a MG/BR 46 Conquista. Para a primeira, o maior impacto do DH verificado somente quando a limitação hídrica foi imposta no enchimento de grãos. Para a segunda, também foi verificado maior impacto sob o aparato fotossintético neste estágio fenológico, mas com maior variação entre os tratamentos. Esta característica é confiável para a seleção de genótipos de soja superiores nas presentes condições experimentais, visto que foram obtidos altos valores de h^2 (97,97) e CV_g/CV_e (2,46).

Ao analisar os dados da taxa de transpiração (E) (Tabela 5), verifica-se que o déficit hídrico impacta drasticamente plantas de soja. A E foi estatisticamente igual entre as duas cultivares exceto quando o DH foi imposto no V4 e no R2, em que esta característica foi maior para a cultivar MG/BR 46 Conquista em relação à Vtorial IPRO. Para a primeira cultivar, a E foi estatisticamente igual sob condições hídricas normais e DH no R2, com impacto nos demais tratamentos. Já para a segunda, todos os tratamentos com DH impactaram de forma igual estatisticamente. Esta característica apresentou elevada contribuição para a variabilidade genética, visto que apresentou aos altos valores dos parâmetros genéticos estimados, h^2 de 95,51 e razão CV_g/CV_e de 1,63.

Tabela 5. Médias de características fisiológicas avaliadas em duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes hídricos.

Tratamentos	E (mmol m ⁻² s ⁻¹)		Tr		TE (g L ⁻¹)	
	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO
Controle	5,12 Aa	7,39 Aa	35,55 Aa	24,63 Ba	0,69 Bc	1,11 Ab
DH V4	2,91 Ab	0,88 Bb	21,91 Ab	19,21 Bc	1,01 Ab	1,24 Ab
DH R2	4,82 Aa	2,05 Bb	14,28 Bf	16,94 Af	1,24 Ba	1,52 Aa
DH R5	1,71 Ab	0,82 Ab	17,93 Bc	20,00 Ab	1,06 Bb	1,33 Ab
DH V4 e R2	2,11 Ab	2,12 Ab	14,58 Be	18,23 Ad	0,82 Bc	1,60 Aa
DH V4 e R5	0,60 Ab	0,55 Ab	16,89 Bd	17,41 Ae	1,30 Ba	1,80 Aa
CV (%)	46,93		9,11		14,58	
h^2	95,51		100		91,88	
CV_g/CV_e	1,63		2,96		1,18	
Tratamentos	A/E (μmol mol ⁻¹)		EUA (L g ⁻¹)		A/g_s (μmol mmol ⁻¹)	

	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO
Controle	4,92 Ab	2,76 Ab	3,09 Ab	1,88 Bc	66,93 Aa	58,57 Ab
DH V4	5,03 Ab	1,81 Bb	2,60 Ac	2,36 Bb	90,51 Aa	67,95 Ab
DH R2	2,86 Ab	4,71 Ab	2,09 Ad	2,31 Ab	67,76 Ba	119,23 Aa
DH R5	2,91 Bb	8,88 Aa	3,30 Aa	3,11 Aa	58,62 Ba	95,89 Aa
DH V4 e R2	3,30 Ab	3,45 Ab	2,26 Ad	2,04 Ac	98,48 Aa	89,70 Aa
DH V4 e R5	9,60 Aa	6,66 Ba	3,44 Aa	3,28 Aa	79,18 Aa	68,94 Ab
CV (%)	31,63		6,07		42,78	
h ²	45,13		98,14		85,8	
CV _g /CV _e	0,32		2,57		0,86	

Médias seguidas com letras minúsculas iguais na coluna e/ou letras maiúsculas iguais na linha não diferem entre si pelo teste de Scott e Knott, a 0,05 de probabilidade. Legenda: *E*: taxa de transpiração, *Tr*: transpiração real, *TE*: eficiência de transpiração, *A/E*: eficiência instantânea de uso da água, *EUA*: eficiência agrônômica de uso da água e *A/g_s*: eficiência intrínseca de uso da água.

O ocorrido com a *E* também foi verificado em relação à transpiração real (*Tr*) (Tabela 5), característica que também exprimiu o alto impacto do DH sob a cultura da soja. Ao analisar os dados dos parâmetros genéticos, considera-se esta característica a mais confiável dentro destas condições experimentais, h² de 100 e CV_g/CV_e de 2,96. Entre as cultivares, as plantas da cultivar MG/BR 46 Conquista apresentaram maior *Tr* que a Vtorial IPRO no controle e DH no V4, comportamento oposto nos demais tratamentos. Foi verificada grande variação entre os tratamentos dentro de cada cultivar, em que o maior impacto para ambas as cultivares ocorreu quando o déficit hídrico foi imposto no estágio R2.

Para melhor aproveitamento dos resultados da *Tr*, os mesmos foram acumulados por fases do desenvolvimento da cultura e por estágio fenológico. Ao analisar os dados da *Tr* por fases de desenvolvimento (Tabela 6), verifica-se que a maior demanda hídrica para a cultura da soja se concentra na fase reprodutiva, comportamento semelhante para ambas as cultivares. Ao analisar os dados dos tratamentos para cada cultivar, considera-se que tal fato é mais evidente com limitação hídrica no R5 e V4/R5 (MG/BR 46 Conquista) e V4/R5 (Vtorial IPRO).

Em relação à eficiência de transpiração (*TE*) (Tabela 5) foi observado que o DH garante maior eficiência em relação à transpiração na soja. Tal fato foi verificado nos tratamentos com DH nos estádios R2, V4/R2 e V4/R5 na cultivar Vtorial IPRO, e no V4/R5 na MG/BR 46 Conquista, com maiores valores para essa característica. Foi

constatada herdabilidade de alta magnitude (91,88) e alta relação CV_g/CV_e (1,18), garantindo boa precisão experimental para essa característica.

As cultivares de soja avaliadas no presente estudo apresentam alta eficiência em relação ao uso da água sob limitação hídrica, principalmente quando o DH foi imposto no R5. Tal fato pode ser constatado ao analisarem os resultados das características eficiência instantânea de uso da água (A/E), eficiência intrínseca de uso da água (A/g_s) e eficiência agrônômica de uso da água (EUA) (Tabela 5).

Sob condições hídricas normais as duas cultivares apresentaram valores estatisticamente iguais, havendo alterações ao se impor o DH, em que, quando o DH foi aplicado no R5, a cultivar Vtorial IPRO apresentou muito maior A/E (Tabela 5) que a MG/BR 46 Conquista, sendo o contrário com DH no V4/R5. Analisando-se os tratamentos dentro de cada cultivar, verificou-se que houve maior A/E com DH no V4/R5 para a cultivar MG/BR 46 Conquista, o que também foi observado para a Vtorial IPRO, mas para ela o valor para essa característica com DH no R5 foi estatisticamente igual. Os valores dos parâmetros genéticos foram muito baixos, não permitindo inferência para as condições experimentais do presente estudo.

A cultivar MG/BR 46 Conquista apresentou maior EUA (Tabela 5) sobre a Vtorial IPRO sob condições hídricas normais e DH no V4. Houve efeito contrário do DH dentro de cada cultivar, em relação ao observado na A/E , em que, para a cultivar MG/BR 46 Conquista, os maiores valores de EUA foram quando o DH foi imposto no R5 e V4/R5, e no R5, para a Vtorial IPRO. Os parâmetros genéticos estimados permitem inferência sobre a resistência da soja ao déficit hídrico, visto que apresentaram altos valores de h^2 e CV_g/CV_e .

A cultivar Vtorial IPRO apresentou maior A/g_s que a MG/BR 46 Conquista sob deficiência hídrica nos estádios R2 e R5. Os tratamentos não apresentaram interferências significativas para a cultivar MG/BR 46 Conquista, mas, para a Vtorial IPRO, houve maior A/g_s com aplicação do DH no R2, R5 e V4/R2. Mesmo apresentando herdabilidade média, esta característica não permite inferência nas presentes condições experimentais, visto que apresentou baixa relação CV_g/CV_e .

Tabela 6: Transpiração real (Tr - %) por fases do desenvolvimento de duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes hídricos.

Período	Vegetativo	Reprodutivo
DAS	0 a 40	41 a 90
MG/BR 46 (Conquista)		
Controle	16,41	81,46
DH V4	12,33	87,67
DH R2	13,59	86,41
DH R5	9,62	90,32
DH V4 e R2	15,48	84,52
DH V4 e R5	9,17	90,83
Vetorial IPRO		
Controle	12,52	87,48
DH V4	12,56	87,44
DH R2	11,08	84,98
DH R5	10,76	89,24
DH V4 e R2	10,04	89,96
DH V4 e R5	9,76	90,24

Transpiração real (%)

Legenda: controle (condições hídricas normais); DH V4: déficit hídrico imposto no estágio fenológico V4; DH R2: déficit hídrico imposto no estágio fenológico R2; DH R5: déficit hídrico imposto no estágio fenológico R5; DH V4 e R2: déficit hídrico imposto nos estádios fenológicos V4 e R2; DH V4 e R5: déficit hídrico imposto nos estádios fenológicos V4 e R5; DAS: dias após à sementeira.

Para se complementar tal afirmativa, os dados da Tr acumulados por estágio fenológico (Tabela 7) exprimem os períodos mais críticos em relação à necessidade hídrica e o impacto da sua limitação. Primeiramente, ao analisar os dados entre os tratamentos e as cultivares, pode-se confirmar o quão o DH ocasiona grandes alterações na cultura da soja, mas com diferenciações entre uma cultivar mais antiga (MG/BR 46 Conquista) e uma cultivar moderna (Vetorial IPRO), que a segunda requer menos água para se desenvolver e reproduzir.

Tabela 6: Transpiração real (Tr - %) por estágio fenológico de duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes hídricos.

Estádio	V1	V2	V3	V4	V5	V6	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
DAS	12	16	21	25	32	38	41	46	55	62	70	74	80	90
MG/BR 46 (Conquista)														
Controle	0,4	0,1	0,1	0,2	6,5	9,2	3,9	6,58	14,4	15,2	12,9	8,71	12,6	7,15
DH V4	3,7	0,8	1,6	1,3	0,5	4,4	3,4	8,18	20,5	11	15,1	8,62	11,5	9,37
DH R2	2,5	0,3	0,7	0,3	2,4	7,5	6	11,3	19	8,67	8,09	9,52	14,6	9,17
DH R5	0,7	0,1	0,3	0,4	1,7	6,4	4,3	8,63	19,5	19,3	19,5	11	6,4	1,69
DH V4 e R2	1,2	0,3	0,8	1,1	7,2	5	2,5	8,81	17,1	9,28	9,28	9,58	15,1	12,9
DH V4 e R5	1,1	0,2	0,3	0,1	3	4,6	2,5	8,38	20,5	17,6	17,1	11,8	6,73	6,38
Vetorial IPRO														
Controle	0,8	0,2	0,5	1	3,3	6,8	3,9	6,28	15,9	14,9	11,6	9,73	14,4	10,6
DH V4	1	0,3	0,9	1,7	5,7	3,1	1,5	5,94	12,4	14,1	13,4	9,84	14,9	15,4

DH R2	0,9	0,1	0,1	0,3	4,2	5,5	6,1	9,18	13,6	6,36	8,47	9,77	15,3	16,2
DH R5	0,8	0,1	0,1	0,2	2,5	7	5,2	10,8	20,9	19,6	17,1	8,85	4,71	2,14
DH V4 e R2	1,5	0,1	0,1	1,4	3,4	3,6	1,7	7,06	16	13,6	15,4	7,47	12	16,8
DH V4 e R5	0,9	0,1	0,2	0,3	3,4	4,8	1,7	7,44	21,8	21,7	19,1	10,2	5,28	3,09

Transpiração real (*Tr* - %)

Legenda: controle (condições hídricas normais); DH V4: déficit hídrico imposto no estágio fenológico V4; DH R2: déficit hídrico imposto no estágio fenológico R2; DH R5: déficit hídrico imposto no estágio fenológico R5; DH V4 e R2: déficit hídrico imposto nos estádios fenológicos V4 e R2; DH V4 e R5: déficit hídrico imposto nos estádios fenológicos V4 e R5. DAS: dias após à sementeira.

Analisando-se os resultados do tratamento controle, verifica-se que, para ambas as cultivares, no estágio V6 as plantas de soja apresentam maior demanda hídrica. Período esse que precede a fase reprodutiva. Porém, ao analisar os dados dos estádios fenológicos do período vegetativo como um todo, observa-se que no início do desenvolvimento as plantas requerem bastante água, período em que as plantas se estabelecem. Ocorre uma evolução do acumulado, com máxima no V6. Neste sentido, dentro da fase vegetativa, os estádios V1 e V6 são os mais críticos em relação à demanda hídrica.

Já para o período reprodutivo, que foi o mais crítico, como verificado anteriormente na Tabela 6, foi verificado que o período que precede o enchimento de grãos é o mais crítico. Houve uma certa variação do acumulado entre as duas cultivares, mas, de forma geral, o período crítico da cultura da soja nessa fase está após o florescimento pleno (R2) e antes do enchimento de grãos (R5).

Em linhas gerais, sob condições hídricas normais a *Tr* é maior no estágio V1 e entre o V4/V5 na fase vegetativa, entre o R3/R4 e no R7 no reprodutivo. Evidenciando-se assim, os períodos críticos em relação à necessidade hídrica da soja, V4/V5 na fase vegetativa e R3/R4 na reprodutiva. Porém, ao analisar os dados dos tratamentos de deficiência hídrica, algumas observações devem ser elucidadas.

Ao se impor o DH no estágio V4, verifica-se que após esse estágio a cultivar Vtorial IPRO requer mais água para se restabelecer, mas ela desenvolve uma capacidade adaptativa em relação à MG/BR 46 Conquista, requerendo menos água até o período crítico da fase reprodutiva. Quando a limitação hídrica foi imposta no R2, o comportamento na fase vegetativa foi similar, mas neste estágio houve grande incremento em relação às condições hídricas normais, ocasionando o adiantamento do período crítico da fase reprodutiva para entre o R2/R3. O DH no R5 e V4/R2 não ocasionou alterações em relação ao período crítico na fase reprodutiva, como observado no tratamento anterior.

Já ao se impor do DH no V4/R5 houve um comportamento interessante, que foi o adiantamento da que da *Tr* no R7 em maior intensidade, mostrando com clareza o início da maturação.

A cultivar MG/BR 46 Conquista apresentou maior índice de clorofila (CL) (Tabela 8) que a Vtorial IPRO sob condições hídricas normais e com o DH imposto no R5, sendo estatisticamente igual nos demais tratamentos. Os tratamentos com deficiência hídrica não ocasionaram impactos significativos para essa cultivar quando impostos no R2 e V4/R2, havendo decréscimo significativo nos demais tratamentos. Já para a Vtorial IPRO, verificam-se os maiores valores de CL nesses tratamentos, maior que no controle e demais tratamentos. A estimativa dos parâmetros genéticos permite inferência para a resistência da soja déficit hídrico, apresentando altos valores de h^2 e relação CV_g/CV_e .

Tabela 8: Médias de características fisiológicas avaliadas em duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes hídricos.

Tratamentos	CL		FLAV	
	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO
Controle	30,97 Aa	21,04 Bb	0,62 Ac	0,67 Ac
DH V4	26,10 Ab	25,97 Ab	0,61 Ac	0,63 Ac
DH R2	30,08 Aa	32,80 Aa	0,64 Ac	0,66 Ac
DH R5	24,98 Ab	18,05 Bb	0,98 Ab	0,78 Bb
DH V4 e R2	32,30 Aa	34,84 Aa	0,63 Ac	0,58 Ac
DH V4 e R5	26,98 Ab	22,85 Ab	1,12 Aa	0,91 Ba
CV (%)	13,91		11,4	
h^2	91,12		96,91	
CV_g/CV_e	1,13		1,98	
Tratamentos	ANT		BIN	
	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO
Controle	0,10 Ab	0,13 Ac	49,90 a	41,29 b
DH V4	0,12 Ab	0,15 Ab	43,50 b	42,91 b
DH R2	0,13 Aa	0,09 Ac	48,07 a	48,80 a
DH R5	0,21 Aa	0,21 Aa	25,91 c	24,66 c
DH V4 e R2	0,10 Ab	0,10 Ac	50,79 a	55,31 a
DH V4 e R5	0,22 Aa	0,16 Bb	23,34 c	24,25 c
CV (%)	17,6		19,88	
h^2	96,13		95,19	
CV_g/CV_e	1,76		1,57	

Médias seguidas com letras minúsculas iguais na coluna e/ou letras maiúsculas iguais na linha não diferem entre si pelo teste de Scott e Knott, a 0,05 de probabilidade. Legenda: índices de CL: clorofila, FLAV: flavonoides, ANT: antocianinas e BINA: balanço interno de nitrogênio.

O índice de flavonoides (FLAV) (Tabela 8) foi estatisticamente igual para as duas cultivares, exceto nos tratamentos com DH no R5 e V4/R5, nos quais este índice foi superior para a MG/BR 46 Conquista, em relação à Vtorial IPRO. A análise deste índice para a primeira cultivar permite inferir que a imposição do DH no V4/R5 possibilitou maior produção destes metabólitos secundários que os demais tratamentos, em que o controle ficou no grupo com menores índices, junto com DH no V4, R2 e V4/R2. Tal comportamento foi igual para a cultivar Vtorial IPRO. Altos valores de h^2 e CV_g/CV_e foram constatados para essa característica, indicando a possibilidade de empregá-lo na seleção fenotípica nas presentes condições experimentais.

O índice médio de antocianinas (ANT) (Tabela 8) foi estatisticamente igual entre as duas cultivares avaliadas, com exceção do tratamento com DH no V4/R5, quando o valor deste índice foi superior para a cultivar MG/BR 46 Conquista, em relação à Vtorial IPRO. Foi constatado um comportamento distinto das duas cultivares avaliadas em relação aos tratamentos. Na primeira, foram constatados valores estatisticamente superiores com DH nos estádios R2, R5 e V4/R5, do que o controle e DH no V4 e V4/R2. Já para a segunda cultivar, este índice foi superior com DH no R5, em relação à limitação hídrica imposta no V4 e V4/R2, com menores valores com DH no V4, controle e DH no V4/R2. Também é permitida a inferência destas características para a seleção de genótipos superiores para a característica em estudo, apresentando altos valores dos parâmetros genéticos (h^2 e CV_g/CV_e).

Outro índice aferido no presente estudo foi o balanço interno de nitrogênio (BIN) (Tabela 8), em que não foram observadas diferenças estatísticas entre as duas cultivares para os tratamentos aplicados. A análise dos tratamentos sobre a cultivar MG/BR 46 Conquista mostra que o DH aplicado no V4/R2, controle e DH no R2 possibilitou maior BIN que os tratamentos com DH no V4, maior que DH no R5 e V4/R5. Houve um comportamento semelhante para a Vtorial IPRO, mas o controle ficou junto com o DH no V4. Foi aferida alta herdabilidade e razão CV_g/CV_e para BIN, permitindo a inferência desta característica sobre a resistência da soja ao déficit hídrico.

A cultivar Vtorial IPRO produziu maior matéria seca total (MST) (Tabela 9) que a MG/BR 46 Conquista para todos os tratamentos, exceto quando o DH foi imposto no estádio V4, no qual ambas apresentaram valor estatisticamente igual. O DH ocasionou

decréscimo na MST para a cultivar MG/BR 46 Conquista, em que o maior impacto sobre esta característica foi constatado quando a limitação hídrica foi imposta nos estádios reprodutivos V4/R2. O DH também ocasionou decréscimo para a Vtorial IPRO, mas foram constatados valores estatisticamente iguais ao controle sob deficiência hídrica quando o DH foi imposto concomitantemente no V4/R2 e V4/R5. O MST apresentou parâmetros genéticos de alta magnitude.

Tabela 9: Médias de características fisiológicas avaliadas em duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes hídricos.

Tratamentos	MST (g)		CR (cm)	
	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO
Controle	39,66 Ba	46,98 Aa	44,17 Aa	31,02 Bb
DH V4	33,10 Ab	33,72 Ab	38,90 Ab	31,27 Bb
DH R2	26,86 Bc	35,69 Ab	32,32 Ac	33,15 Ab
DH R5	29,25 Bc	35,68 Ab	28,02 Bc	34,80 Aa
DH V4 e R2	20,27 Bd	41,21 Aa	33,15 Ac	31,65 Ab
DH V4 e R5	31,42 Bb	43,55 Aa	30,70 Bc	36,75 Aa
CV (%)	10,95		8,5	
h ²	92,18		79,2	
CV _g /CV _e	1,21		0,69	
Tratamentos	FMPA		FMR	
	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO	BR/46 Conquista	Vtorial IPRO
Controle	0,62 Aa	0,58 Ab	0,37 Aa	0,41 Aa
DH V4	0,67 Aa	0,71 Aa	0,33 Aa	0,29 Ab
DH R2	0,65 Ba	0,72 Aa	0,34 Aa	0,27 Bb
DH R5	0,64 Ba	0,74 Aa	0,35 Aa	0,25 Bb
DH V4 e R2	0,59 Ba	0,71 Aa	0,40 Aa	0,29 Bb
DH V4 e R5	0,68 Aa	0,72 Aa	0,31 Aa	0,28 Ab
CV (%)	7,01		14,43	
h ²	80,06		80,06	
CV _g /CV _e	0,7		0,7	

Médias seguidas com letras minúsculas iguais na coluna e/ou letras maiúsculas iguais na linha não diferem entre si pelo teste de Scott e Knott, a 0,05 de probabilidade. Legenda: 1mst; matéria seca total; CR: comprimento radicular; FMPA: fração de matéria da parte aérea; FMR: fração de matéria radicular.

O aprofundamento radicular (Tabela 9) das duas cultivares foi estatisticamente igual quando o DH foi aplicado no R2 e V4/R2. E a cultivar MG/BR 46 Conquista

apresentou maior comprimento radicular (CR) que a Vtorial IPRO no controle e DH no V4, com efeito reverso sob limitação hídrica imposta no R5 e V4/R5. A deficiência hídrica diminuiu o aprofundamento radicular da cultivar MG/BR 46 Conquista, em que o maior impacto foi constatado quando o DH foi imposto na fase reprodutiva (R2, R5) e simultaneamente nas fases vegetativas e reprodutivas (V4/R2 e V4/R5). Houve um comportamento diferente da cultivar Vtorial IPRO em relação ao CR. As plantas com maior aprofundamento radicular foram as que receberam do DH no R5 e V4/R5, em que se verificou que menor CR no controle e DH no V4, R2 e V4/R2. Porém, o CR apresentou parâmetros genéticos com baixa magnitude para as condições experimentais do presente estudo.

Em linhas gerais, as plantas da cultivar Vtorial IPRO apresentaram maior fração de matéria da parte aérea (FMPA) (Tabela 9), do que a MG/BR 46 Conquista, com exceção do controle e DH no V4 e V4/R5, quando os valores desta característica foram estatisticamente iguais entre ambas as cultivares. Não foram aferidas diferenças estatísticas na MG/BR 46 Conquista e os tratamentos com DH apresentaram maiores valores que o controle para a cultivar Vtorial IPRO. Os parâmetros genéticos estimados para a FMPA não foram de alta magnitude.

Em relação à fração de matéria radicular (FMR) (Tabela 9), a cultivar MG/BR 46 Conquista apresentou maiores valores em relação à Vtorial IPRO, com valores estatisticamente iguais no controle, e DH no V4 e V4/R5. Não foram constatadas diferenças significativas entre os tratamentos para a cultivar MG/BR 46 Conquista e o DH impactou negativamente a FMR do que o controle, para a Vtorial IPRO. E os valores dos parâmetros genéticos foram iguais aos estimados para a FMPA, sendo baixos e não permitindo inferência sobre a resistência da soja ao déficit hídrico.

Importância de caracteres

O caractere que apresentou maior contribuição foi a produtividade de grãos (PROD), 69,37 % (Tabela 10) respectivamente. Juntamente com a PROD, as variáveis com maior importância foram peso de cem grãos (PCG - 10,67%), número de vagens por planta (NVPP - 9,5%), número de grãos por vagem (NGPV - 3,21%), fração de matéria da parte aérea (FMPA - 3,09%) e eficiência agrônômica de uso da água (EUA - 1,67%). As demais características, com valores abaixo de 1% exprimiram menor contribuição para

a diversidade genética. Já as características APM, g_s , A/g_s , TE, FLAV, BIN, OLEO, PROT, MST, CR e FMR não apresentaram contribuição.

Tabela 10. Importância de caracteres fenotípicos avaliados em duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes.

Característica	S_i	CR %	Característica	S_j	CR %
APM	0	0	A/g_s	0	0
AIPV	81,647	0,0127	A/E	175,19	0,0273
NVPP	60980,9	9,505	EUA	10744,6	1,6748
NGPV	20645,3	3,218	TE	0	0
PCG	68476,3	10,6733	CL	2100,83	0,3275
IC	997,487	0,1555	FLAV	0	0
PROD	445066	69,3719	ANT	540,689	0,0843
A	7750,4	1,208	BIN	0	0
g_s	0	0	OLEO	0	0
q_L	132,071	0,0206	PROT	0	0
F_v'/F_m'	25,7742	0,004	MST	0	0
F_v/F_m	2207,82	0,3441	CR	0	0
E	1726,85	0,2692	FMPA	19871,1	3,0973
Tr	42,1963	0,0066	FMR	0	0

Estimativas da contribuição de parâmetros fenotípicos (S_j) para a diversidade genética, distância generalizada de Mahalanobis (SINGH, 1981) e como seus valores de contribuição relativa (CR %). Legenda: altura da planta na maturidade (APM), altura de inserção da primeira vagem (AIPV), número de vagens por planta (NVPP), número de grãos por vagem (NGPV), peso de cem grãos (PCG), índice de colheita (IC), produtividade de grãos (PROD), taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (g_s), coeficiente fotoquímico (q_L), eficiência fotoquímica efetiva (F_v'/F_m'), rendimento quântico do fotossistema II (F_v/F_m), taxa de transpiração (E), transpiração real (Tr), eficiência instantânea de uso da água (A/E), eficiência intrínseca de uso da água (A/g_s), eficiência agrônômica de uso da água (EUA), eficiência de transpiração (TE), índices de clorofila (CL), flavonoides (FLAV), antocianinas (ANT) e balanço interno de nitrogênio (BIN), concentrações de óleo (OLEO) e proteína (PROT), matéria seca total (MST), comprimento radicular (CR), fração de matéria da parte aérea (FMPA) e fração de matéria radicular (FMR).

Correlações fenotípicas

As características selecionados para a análise das correlações fenotípicas foram: altura de inserção da primeira vagem (AIPV), número de vagens por planta (NVPP), número de grãos por vagem (NGPV), peso de cem grãos (PCG), índice de colheita (IC), produtividade de grãos (PROD), taxa fotossintética líquida (A), coeficiente fotoquímico (q_L), eficiência fotoquímica efetiva (F_v'/F_m'), rendimento quântico do fotossistema II (F_v/F_m), taxa de transpiração (E), transpiração real (Tr), eficiência instantânea de uso da água (A/E), eficiência agrônômica de uso da água (EUA) e índices de clorofila (CL) e antocianinas (ANT) (Tabela 11). Os mesmos foram selecionados com base em sua importância para a produtividade de grãos de soja e possível relação com a resistência ao déficit hídrico. Houve grande variação entre os valores das correlações fenotípicas das características avaliados no presente estudo, de -0,019 (NVPP vs CL) a 0,962 (PCG vs PROD).

Os valores dentro do esperado são entre -1 a 1, permitindo inferência. As estimativas de correlações fenotípicas predominantemente de alta magnitude positiva, acima de 0,7, foram entre PCG vs NVPP e NGPV; IC vs NVPP e PCG; PROD vs NVPP, NGPV, PCG e IC; A vs NVPP, NGPV, PCG, IC e PROD; q_L vs PCG e IC; F_v/F_m vs NVPP; E vs NVPP, NGPV, PCG, IC, PROD e A ; EUA vs A/E ; CL vs q_L ; e ANT vs EUA e CL. As correlações predominantemente de alta magnitude negativa foram entre A/E vs q_L ; EUA vs q_L ; CL vs EUA; e ANT vs CL. E as características F_v/F_m e F_v'/F_m' não se correlacionaram entre si.

Tabela 11. Correlações fenotípicas entre caracteres agronômicos e características fenotípicas avaliadas em duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes hídricos.

Parâmetros	NVPP	NGPV	PCG	IC	PROD	A	q_L	F_v'/F_m'	F_v/F_m	E	Tr	A/E	EUA	CL	ANT
AIPV	0,160	-0,093	-0,098	0,094	-0,046	-0,351	-0,131	-0,697	0,571	-0,396	-0,521	-0,021	-0,295	0,299	-0,193
NVPP		0,695	0,858	0,748	0,950	0,827	0,364	0,297	0,711	0,741	0,357	-0,297	-0,241	-0,019	-0,432
NGPV			0,731	0,655	0,808	0,799	0,606	0,387	0,641	0,785	0,047	-0,537	-0,509	0,174	-0,615
PCG				0,945	0,962	0,925	0,751	0,189	0,482	0,922	0,370	-0,675	-0,471	0,250	-0,691
IC					0,860	0,788	0,865	-0,096	0,539	0,822	0,106	-0,801	-0,697	0,531	-0,865
PROD						0,945	0,596	0,336	0,614	0,902	0,373	-0,506	-0,375	0,103	-0,584
A							0,632	0,535	0,443	0,984	0,427	-0,465	-0,329	0,083	-0,539
q_L								-0,147	0,290	0,743	-0,104	-0,920	-0,830	0,721	-0,928
F_v'/F_m'									0,000	0,469	0,487	0,360	0,382	-0,538	0,284
F_v/F_m										0,391	-0,382	-0,188	-0,579	0,370	-0,572
E											0,348	-0,562	-0,436	0,218	-0,633
Tr												0,039	0,611	-0,699	0,369
A/E													0,732	-0,608	0,837
EUA														-0,933	0,960
CL															-0,848

Legenda: altura de inserção da primeira vagem (AIPV), número de vagens por planta (NVPP), número de grãos por vagem (NGPV), peso de cem grãos (PCG), índice de colheita (IC), produtividade de grãos (PROD), taxa fotossintética líquida (A), coeficiente fotoquímico (q_L), eficiência fotoquímica efetiva (F_v'/F_m'), rendimento quântico do fotossistema II (F_v/F_m), taxa de transpiração (E), transpiração real (Tr), eficiência instantânea de uso da água (A/E), eficiência agrônômica de uso da água (EUA) e índices de clorofila (CL) e antocianinas (ANT).

Análise de trilha

A estimativa das correlações de Pearson (Tabela 12) infere a associação linear entre dois parâmetros fenotípicos avaliados no presente estudo, em que há mais perfeita correlação direta, os valores mais próximos a 1 e mais perfeita correlação inversa, os valores mais próximos de -1. A mais perfeita correlação direta ocorreu entre *A* vs *E* (0,9839), seguida pelas entre *EUA* vs *ANT* (0,9604); *A* vs *PROD* (0,9447); *E* vs *PROD* (0,9018); *IC* vs *PROD* (0,8597); *IC* vs *E* (0,8223); e *IC* vs *A* (0,7876). E a mais perfeita correlação indireta aconteceu entre *IC* vs *ANT* (-0,845), seguida pela entre *CL* vs *ANT* (0,8478).

Tabela 12. Estimativas das correlações de Pearson entre caracteres agrônômicos e características fisiológicas avaliadas em duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes hídricos.

	<i>IC</i>	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>Tr</i>	<i>EUA</i>	<i>CL</i>	<i>ANT</i>
<i>A</i>	0.7876						
<i>E</i>	0.8223	0.9839					
<i>Tr</i>	0.1057	0.4267	0.3479				
<i>EUA</i>	-0.6971	-0.3289	-0.436	0.611			
<i>CL</i>	0.5309	0.0829	0.2175	-0.6989	-0.9325		
<i>ANT</i>	-0.8645	-0.5393	-0.6328	0.3685	0.9604	-0.8478	
<i>PROD</i>	0.8597	0.9447	0.9018	0.3727	-0.3747	0.1034	-0.5842

Legenda: produtividade (*PROD*), índice de colheita (*IC*), taxa fotossintética líquida (*A*), taxa de transpiração (*E*), transpiração real (*Tr*), eficiência agrônômica no uso da água (*EUA*) e índices de clorofila (*CL*) e antocianinas (*ANT*).

A estimativa dos efeitos fenotípicos diretos e indiretos das variáveis expectativas inferiu que as variáveis expectativas selecionadas para a análise explicaram 91,55% (R^2) da variação total sobre a produtividade de grãos (*PROD*), com efeito residual de 0,29 (Tabela 13). Portanto, o modelo explicativo adotado na análise indicou a causa e efeito entre as variáveis expectativas e a *PROD*.

Tabela 13. Estimativas dos efeitos fenotípicos diretos e indiretos realizados com os dados de média das duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes hídricos., realizadas com os dados de média duas cultivares de soja cultivadas sob diferentes regimes hídricos.

Caracteres	Coefficientes de trilha	VIF
------------	-------------------------	-----

IC		
efeito direto sobre PROD	0.486372	6.222.422
efeito indireto via A	0.327468	3.906.053
efeito indireto via E	0.088104	4.326.662
efeito indireto via Tr	-0.00802	0.043466
efeito indireto via EUA	0.02581	393.223
efeito indireto via CL	-0.18912	1.417.473
efeito indireto via ANT	0.08767	6.147.888
Total	0.8597	-
A		
efeito direto sobre PROD	0.41578	7.412.648
efeito indireto via IC	0.383067	327.887
efeito indireto via E	0.105419	6.194.383
efeito indireto via Tr	-0.03236	0.706705
efeito indireto via EUA	0.012177	0.875627
efeito indireto via CL	-0.02953	0.034695
efeito indireto via ANT	0.054691	2.392.034
Total	0.9447	-
E		
efeito direto sobre PROD	0.107144	7.532.079
efeito indireto via IC	0.399944	3.574.354
efeito indireto via A	0.409086	6.096.163
efeito indireto via Tr	-0.02638	0.469584
efeito indireto via EUA	0.016143	1.538.417
efeito indireto via CL	-0.07748	0.237838
efeito indireto via ANT	0.064173	329.357
Total	0.9018	-
Tr		
efeito direto sobre PROD	-0.07584	4.568.413
efeito indireto via IC	0.05141	0.059203
efeito indireto via A	0.177413	1.146.691
efeito indireto via E	0.037275	0.774218
efeito indireto via EUA	-0.02262	3.020.995
efeito indireto via CL	0.248962	2.456.316
efeito indireto via ANT	-0.03737	111.705
Total	0.3727	-
EUA		
efeito direto sobre PROD	-0.03702	9.526.405
efeito indireto via IC	-0.33905	2.568.439
efeito indireto via A	-0.13675	0.68134
efeito indireto via E	-0.04671	1.216.354
efeito indireto via Tr	-0.04634	1.448.726
efeito indireto via CL	0.332175	4.372.595

efeito indireto via ANT	-0.0974	7.587.386
total	-0.3747	-
CL		
efeito direto sobre PROD	-0.35622	5.919.114
efeito indireto via IC	0.258215	1.490.107
efeito indireto via A	0.034468	0.04345
efeito indireto via E	0.023304	0.302649
efeito indireto via Tr	0.053004	1.895.802
efeito indireto via EUA	0.034525	7.037.389
efeito indireto via ANT	0.085976	5.912.633
total	0.1034	-
ANT		
efeito direto sobre PROD	-0.10141	9.682.999
efeito indireto via IC	-0.42047	3.950.713
efeito indireto via A	-0.22423	1.831.179
efeito indireto via E	-0.0678	2.561.957
efeito indireto via Tr	-0.02795	0.527021
efeito indireto via EUA	-0.03556	7.464.682
efeito indireto via ANT	0.302003	361.433
Total	-0.5842	
Valor k	0.084972	-
Coeficiente de determinação (R ²)	0.915562	-
Efeito da variável residual	0.290582	-

As variáveis consideradas como expectativas, índice de colheita (IC), taxa fotossintética líquida (A), taxa de transpiração (E), transpiração real (Tr), eficiência agrônômica no uso da água (EUA) e índices de clorofila (CL) e antocianinas (ANT), sobre a variável principal produtividade (PROD).

Os maiores efeitos totais observados foram para as características A (0,9447) e E (0,9018). Ao avaliar a análise individual dos efeitos diretos e indiretos das variáveis expectativas, constatou-se os maiores efeitos diretos sobre PROD, acima do residual, foi para IC (0,4863) e A (0,4157). Ambas características apresentam equivalente importância, visto que os efeitos indiretos de ambos também foram acima do residual, sendo via A (0,3274), para o primeiro, e IC (0,3830), para o segundo. Evidenciando um efeito reverso. Portanto, essas duas características apresentam a possibilidade de ganho em PROD em um processo de seleção simultânea de genótipos de soja resistentes ao déficit hídrico.

5 DISCUSSÃO

Para se conhecer o efeito da seca sobre o desenvolvimento de espécies leguminosas, como a soja, é de suma importância entender seus efeitos, mecanismos, além de conhecer a base agrônômica e genética da seca, com vistas ao desenvolvimento de um manejo sustentável (NADEEM et al., 2019). A seca envolve a ação simultânea de outros fatores abióticos, apresentando forte influência da temperatura (SEVERSIKE et al. 2011). Neste sentido, para o real conhecimento do impacto que o déficit hídrico ocasiona no desenvolvimento da soja, no presente estudo, as plantas foram condicionadas apenas à limitação hídrica, com o controle de qualquer outro fator que pudesse ocasionar influência.

Foram levantadas três oportunidades de crescimento em relação ao conhecimento do déficit hídrico na soja, eliminando os efeitos de qualquer outro fator abiótico e biótico. A primeira foi o conhecimento dos efeitos que a aplicação do déficit hídrico ao longo de todo o ciclo da cultura. A segunda, o conhecimento do período mais crítico da soja em relação ao déficit hídrico. E a terceira, a definição de um protocolo de seleção fenotípica para a resistência da soja ao déficit hídrico, utilizando características fenotípicas estratégicas e de fácil avaliação e aplicação.

Para se conhecer o efeito do déficit hídrico sobre o desenvolvimento de espécies leguminosas, como a soja, é de suma importância entender seus efeitos, mecanismos, além de conhecer a base agrônômica e genética da limitação hídrica, com vistas ao desenvolvimento de um manejo sustentável (NADEEM et al., 2019). A produtividade de grãos é o parâmetro mais importante para a maioria das espécies vegetais. A fenologia da soja é algo crítico para o melhoramento genético, pois a melhor produtividade está positivamente correlacionada com a maturidade tardia (DIERS et al., 2018).

Portanto, no presente estudo, ocorreram apenas variações na disponibilidade hídrica por meio da aplicação dos tratamentos, em que o controle permitiu as condições adequadas para o desenvolvimento e reprodução da cultura. Foram constatados diversos impactos destes tratamentos sobre as cultivares avaliadas no presente estudo.

A produtividade de grãos é a característica mais importante para a maioria das espécies vegetais. A fenologia da soja é algo crítico para o melhoramento genético, pois a melhor produtividade está positivamente correlacionada com a maturidade tardia (DIERS et al., 2018). Mesmo o DH imposto no estágio V4 ocasionando decréscimo na

PROD (Tabela 3), a seleção precoce para resistência ao déficit hídrico pode ser um indicativo de ganhos para essa característica. Isto ao se verificar, como no desempenho produtivo da cultivar Vtorial IPRO, que ao receber a limitação hídrica no V4 e também no V4/R2, a PROD foi estatisticamente igual. Essa igualdade estatisticamente no V4 também foi verificada para o número de grãos por vagem (NGPV) e rendimento quântico do fotossistema II (F_v/F_m).

A produtividade brasileira média de grãos de soja na safra 2018/2019, segundo o sexto levantamento da Conab (2019), foi de 3.168,00 kg ha⁻¹. Sob condições hídricas normais, a cultivar MG/BR 46 Conquista produziu 3070,81 kg ha⁻¹ e a Vtorial IPRO 3509,90 kg ha⁻¹. Portanto, o rendimento de grãos de ambas foi dentro do esperado, sendo que o maior impacto produtivo ocorreu quando o DH foi imposto no V4/R5, para a primeira (1453,32 kg ha⁻¹), e no R5, para a segunda (1719,22 kg ha⁻¹). Tal fato, caracteriza a seleção de impacto próximo ao período de enchimento de grãos. Rezende e Carvalho (2007) obtiveram produtividade de 2897,00 kg ha⁻¹ para a cultivar MG/BR 46 Conquista em seu estudo conduzido na região Sul de Minas Gerais, em que o resultado exprimido no presente estudo, possibilitou uma melhor performance da mesma.

Oya et al. (2004) também constataram o efeito do DH sobre o índice de colheita (IC) de cultivares de soja brasileiras. Porém, a cultivar MG/BR 46 Conquista apresentou valores mais altos que a Vtorial IPRO, evidenciando-se assim, sua capacidade produtiva superior sob limitação hídrica. O IC é uma forma de simular a produtividade real de soja. A variação neste caractere tem grande influência em detrimento das condições climáticas ao longo do desenvolvimento da cultura da soja (RICHETTI et al., 2015), como verificado no presente estudo.

Dentre os efeitos negativos da seca às leguminosas, são observados sérios danos ao aparato fotossintético, a diminuição da fotossíntese líquida e a redução da captação de nutrientes (NADEEM et al., 2019). No presente estudo, ficou claro que o déficit hídrico ocasiona grande decréscimo na taxa fotossintética líquida (A) (Tabela 4) em todos os tratamentos de DH em relação às duas cultivares.

As quedas nos resultados das características fotossintéticas verificados no presente estudo se assemelham aos observados por Iqbal et al. (2019), quando se passaram cinco dias após a imposição do déficit hídrico. Como observado, o decréscimo na A é atribuído a quedas na condutância estomática (g_s) em plantas de soja sob DH, resultando

em baixa produtividade de grãos (CHAVES et al., 2009). Como verificado no presente estudo, Gavili, Moosavi e Haghghi (2019) também obtiveram grandes impactos do déficit hídrico sobre a g_s próximo ao estágio R5, em que foi atribuído esse como o efeito mais desfavorável do DH. Comparando-se com o tratamento controle, os autores também verificaram o impacto do DH sobre o índice de colheita e a eficiência uso da água. Tal fato alterou o consumo hídrico e no presente estudo a limitação hídrica ocasionou alterações nesta característica também, tanto na média geral (Tr – Tabela 5) quanto nos estádios fenológicos (Tr - Tabela 7).

No presente estudo, foram observados danos ao aparato fotossintético, o que pode ser verificado nos dados do rendimento quântico do fotossistema II (F_v/F_m) (Tabela 4). Porém, para a cultivar Vtorial IPRO, os danos observados através da análise dessa característica foram menores que os observados para a MG/BR 46 Conquista. Foi diagnosticado decréscimo significativo apenas quando o DH foi imposto no estágio R5.

A fotossíntese é afetada de maneira significativa pela limitação hídrica, uma vez que é bloqueado o transporte de energia do fotossistema II (PSII) para o fotossistema I (PSI) (SIDDIQUE et al., 2016). O parâmetro da fluorescência da clorofila, F_v/F_m , indica diferentes respostas da fotossíntese à seca (KALAJI et al., 2018). Este resultado é importante para o melhoramento de plantas visando a seleção de genótipos com resistência ao déficit hídrico. Esta característica fisiológica é facilmente avaliada, utilizando clorofilômetro portátil, possibilitando a avaliação de grande número de genótipos em pouco espaço de tempo. No presente estudo, a mesma apresentou herdabilidade de 97,97 e relação CV_g/CV_e de 2,46, permitindo ganhos de seleção.

Iqbal et al. (2019) também verificaram significativas mudanças na fluorescência da clorofila em resposta ao desequilíbrio induzido pelas condições de déficit hídrico, com alterações verificadas a partir do quinto dia de estresse. A variação no F_v/F_m verificada no presente estudo corrobora com as do estudo destes autores, apontando que alterações nas taxas fotossintéticas em condições de limitação hídrica estão diretamente associadas com alterações nas características de fluorescência da clorofila. Os autores complementam que os valores desta característica são maiores em cultivares resistentes, do que em suscetíveis, sendo acima de 0,8, e que alterações nas taxas fotossintéticas sob limitação hídrica estão diretamente associadas a alterações em parâmetros de fluorescência da clorofila.

Uma característica indicativa de resistência ao déficit hídrico em soja é a transpiração e ela está relacionado à produtividade de grãos e aos efeitos da limitação hídrica sob a taxa fotossintética (CHOWDHURY et al., 2016), como verificado no presente estudo. O potencial adaptativo de algumas espécies vegetais para reduzir perdas de água se associa à redução da taxa de transpiração (TARDIEU e DAVIES, 1996). Tal decréscimo nesta característica sob condições estressantes pode ser considerado um mecanismo de evitação (ISLAM et al., 2004). Como essa característica apresentou parâmetros genéticos de elevada magnitude, isto implica na sua utilização para a seleção nas condições experimentais. Campos (2016) verificaram que plantas mantidas sob limitação hídrica a 30% da capacidade de campo apresentaram reduções de área foliar a partir dos 50 dias de imposição do DH. Isto ocasionou uma antecipação da senescência, tentando diminuir a perda de água pela transpiração. Um fato interessante verificado no presente estudo foi a correlação de alta magnitude entre a *E* e importantes componentes de produção, NVPP, NGPV, PCG e IC, com a PROD e A. Este fato indica a ligação direta da disponibilidade hídrica sobre características estratégicas de desempenho produtivo e à fotossíntese, que é a característica fisiológica mais ligado à resistência ao déficit hídrico.

O controle da sensibilidade de transpiração em resposta à deficiência hídrica no solo contribui para estratégias de murchas conhecidas por serem vantajosas para agregar maior resistência déficit hídrico e maior comprimento radicular para permitir maior aquisição de água do solo (SEVERSIKE et al., 2014). No presente estudo, esta foi uma capacidade adaptativa observada a partir dos dados da eficiência de transpiração (*TE* – Tabela 5), que indicam que a plantas apresentaram maior eficiência de transpiração sob limitação hídrica, com ênfase nos dados obtidos com DH no R2 e V4/R5, que foram os maiores para as duas cultivares, acrescentando o dado com DH no V4/R2 para a cultivar Vtorial IPRO. Em linhas gerais, essa cultivar apresentou maior *TE* que a MG/BR 46 Conquista.

A restrição da transpiração está relacionada a altos valores do déficit de pressão de vapor (VPD), que leva à *TE*. E há larga variação genotípica na restrição da transpiração sob alto VPD em soja (FLETCHER et al., 2007). Os maiores valores de *TE* para ambas as cultivares foi quando o DH foi imposto no V4/R5 (Tabela 5). Vadez et al. (2014) citam que período de enchimento de grãos é a fase mais crítica, como verificado no presente estudo, que a fase mais crítica no período reprodutivo é o estágio R5 (*Tr* - Tabela 7). Os autores evidenciam que a *TE* é um importante componente da EUA, com correlação

positiva entre os mesmos (Tabela 11). Tal fato está altamente evidenciado na Tabela 5, em que, para cultivar MG/BR 46 Conquista, o maior valor de *TE* foi no V4/R5, com maior EUA também neste estágio fenológico. Além da maior sensibilidade da fase reprodutiva, Heinemann et al. (2011) citam que a limitação na disponibilidade hídrica implica na diminuição desta fase.

As alterações na transpiração podem estar ligadas às transformações anatômicas das células mesofílicas que a restrição de água pode ocasionar, bem como a evaporação de água dos espaços intercelulares e incremento da resistência do mesófilo. Isto pode ser um indicativo de adaptação ao déficit hídrico, que ocasiona um incremento na superfície de contato celular, facilitando a captura de energia luminosa e elementos gasosos, os quais são importantes para o processo fotossintético (POLIZEL et al., 2011).

A *TE* é uma característica eficiente correlacionado à resistência ao déficit hídrico em soja, avaliado em casa de vegetação e no campo. Sendo assim, o mesmo apresenta potencial utilidade para o desenvolvimento de genótipos de soja resistentes sob condições de limitação hídrica (PEIRONE et al., 2018).

A redução da umidade induz a quedas nas taxas fotossintéticas (*A*), o que ocasiona decréscimos na produção de matéria seca (GRASSI e MAGNANI, 2005; RAZA et al., 2018). Tal fato foi observado no presente estudo, em que houve drástica queda nos valores de *A* ao se aplicar os tratamentos de DH. Também foi verificado impacto sobre a produção de matéria seca total (MST). Porém, foi observado um fato interessante nesta característica para a cultivar Vtorial IPRO, em que os valores de MST ao se impor o DH concomitantemente nos estádios V4/R2 e V4/R5 foram estatisticamente iguais ao controle. Tal fato pode estar ligado ao desenvolvimento de certa plasticidade fenotípica, que é a habilidade de um genótipo alterar o seu fenótipo em resposta a alterações ambientais (ASPINWALL et al., 2015). O mesmo foi observado em ambas as cultivares para os índices de clorofila (CL) e balanço interno de nitrogênio (BIN) (Tabela 8), em que os valores destes índices com DH no V4/R2 foram estatisticamente iguais ao controle.

O fato observado na variação da *A* e BIN em relação ao DH indica que a seca afeta negativamente características fotossintéticas e fixação biológica de nitrogênio (CEREZINI et al., 2017), impactando negativamente o suprimento de N das plantas de soja (SINCLAIR et al., 2007; SINCLAIR e VADEZ, 2012). O DH também ocasiona quedas no conteúdo de clorofilas nas folhas de soja (WU e ZHANG, 2019), em que foram

verificadas alterações no índice de clorofila em relação aos tratamentos impostos. Thomas e Howarth (2000) exprimem que plantas de soja podem antecipar o processo de senescência quando ocorrem reduções precoces nos valores de clorofila.

Os resultados do presente estudo indicam que plantas de soja avaliadas apresentam a capacidade de acumular antocianinas (ANT) sob limitação hídrica. Nakabayashi et al. (2014) citam a contribuição do acúmulo de antocianinas para a tolerância à seca. Somado ao efeito das antocianinas, os autores relatam que os flavonoides também apresentam atividade para atenuar o estresse oxidativo e a seca em planta modelo (*Arabidopsis thaliana*). Fato que confirma a utilidade dos flavonoides (FLAV) para aumentar a resistência ao déficit hídrico. Ao apresentarem alta magnitude para os parâmetros genéticos estimados, estas características podem ser utilizadas com segurança para a seleção de genótipos resistentes ao déficit hídrico. Além disso, a característica ANT apresentou alta correlação positiva com EUA, alta correlação negativa com IC (Tabela 12) e correlação indireta com PROD (Tabela 11).

Os ótimos resultados obtidos para as características aferidos com o aparelho Dualex (CL, FLAV, ANT e BIN) conferem a sua utilização em programas de melhoramento de soja para resistência ao déficit hídrico. Visto que, além das características apresentarem resultados confiáveis e com parâmetros genéticos de alta magnitude, a avaliação realizada com este equipamento é muito simples e rápida, permitindo a avaliação de grande número de plantas em larga escala.

O fato observado na cultivar Vtorial IPRO em relação ao comprimento radicular também foi verificado por Manavalan et al. (2009), em que, ao se impor o DH nos estádios mais tardios da fase reprodutiva, houve grande incremento no crescimento radicular. Segundo os autores, isto evidencia que, se a planta de soja desenvolve precocemente um grande sistema radicular, ela apresentará uma excelente possibilidade para manter sua turgescência sob condições de seca. Porém, no presente estudo, foi verificado que, em linhas gerais, a cultivar MG/BR 46 Conquista apresenta maiores habilidades em relação ao aprofundamento e a robustez do sistema radicular que a Vtorial IPRO. A primeira cultivar é mais antiga, com lançamento em 1998, que a segunda, uma cultivar moderna. Seversike et al. (2014) verificaram que cultivares de soja antigas expressaram sistemas radiculares muito mais aprofundados que modernas. Casagrande et al. (2001) citam que a cultivar MG/BR 46 Conquista apresenta tolerância a períodos de limitação hídrica. Fried et al. (2019) consideram que um sistema radicular robusto apresenta vantagem adaptativa para a produtividade de grãos e/ou tolerância ao déficit hídrico.

A imposição gradual da limitação hídrica realizada no presente estudo corrobora com as observações anteriores, pois as condições experimentais presentes possibilitaram a obtenção de dados interessantes em relação à variabilidade genética da soja à essa característica extremamente estratégica. Em relação aos caracteres agrônômicos, a estimativa dos parâmetros genéticos com tão alta magnitude confere grande confiabilidade na forma em que os tratamentos foram aplicados às cultivares de soja avaliadas. Com exceção da altura de inserção da primeira vagem (AIPV), os demais seis apresentaram herdabilidade (h^2) acima de 90%. O dado mais importante entre esses parâmetros fenotípicos foi o da produtividade de grãos (PROD), que apresentou h^2 de 99,46% e relação CV_g/CV_e de 4,81.

Outros três caracteres agrônômicos altamente estratégicos, com base nos dados obtidos no presente estudo, são o número de vagens por planta (NVPP), número de grãos por vagem (NGPV) e peso de cem grãos (PCG). A h^2 estimada para esses caracteres foi acima de 97% e CV_g/CV_e acima de 2,0. Os maiores valores dos parâmetros genéticos entre as características fisiológicas avaliados no presente estudo foram encontrados para A , q_L , Tr e EUA. Sendo que a EUA foi das características com contribuição relevante para a variação, a A teve correlação direta de alta magnitude e efeito direto sobre PROD, Tr apresentou h^2 de 100% e o q_L representa a utilização da energia luminosa pela fase fotoquímica da fotossíntese e a recuperação após a reidratação relacionada a esta característica indica o seu maior desempenho fotossintético frente a uma condição estressante (CAMPOSTRINI, 1997). E esta característica fisiológica apresentou correlação direta de alta magnitude com IC, um caractere agrônômico extremamente estratégico.

Os resultados das duas cultivares relacionados ao EUA implicam na inferência da capacidade de ambas em tolerar períodos de seca. Esta característica é altamente utilizada como um indicador importante da performance produtiva sob condições estressantes, bem como um componente da resistência a esse fator. Ele é utilizado para a sugestão de que a produção de plantas em regime de sequeiro pode ser incrementada por unidade de água usada, o que resulta em “maior colheita por água utilizada” (BLUM, 2009).

Tal fato é mais ainda evidenciado verificando que a maior EUA de ambas as cultivares foi obtido sob limitação hídrica imposta no estágio R5 e concomitantemente no V4 e R5. Os resultados mostraram que a cultivar MG/BR 46 Conquista apresenta

maior EUA que a Vtorial IPRO sob condições hídricas normais e com DH imposto no V4, mas se igualam estatisticamente para os demais tratamentos estudados. A eficiência agronômica no uso da água medida no presente estudo, com o auxílio de lisímetros de pesagem, é uma prática de difícil aplicação geral. Porém, a EUA pode ser facilmente avaliada utilizando-se um analisador de gases infravermelho (Li 6400XT, Li-Cor, Lincon, EUA), como realizado também. O uso deste equipamento permite a fenotipagem em larga escala.

O fato verificado entre as características descritas anteriormente corrobora com os apontamentos feitos por Reynolds e Tuberosa (2008) e Passioura (1996), que indicaram o uso da água (UA), eficiência no uso da água (EUA) e o índice de colheita como direcionamento para o rendimento. Blum (2009) acrescenta que o UA e o IC são os motores do rendimento, e sugere que a eficiência no uso da água é mais um passageiro. O autor considerou o IC como sendo um fator de assimilação do particionamento e o sucesso reprodutivo durante a limitação hídrica, mas que também é amplamente influenciado pelo estado da água e da planta. Isto leva à consideração destas características para a seleção eficiente para a resistência ao déficit hídrico, como verificado no presente estudo.

A correlação positiva de alta magnitude entre o índice de colheita (IC) e produtividade de grãos (PROD) verificada no presente estudo corrobora com o observado por Iqbal et al. (2003) e Showkat e Tyagi (2010). A eficiência da produção da soja pode ser expressa pelo IC (DAVIDSON e DONALD, 1962). Este caractere apresenta sensibilidade frente às influências ambientais, como a PROD, em que existem dois fatores importantes que podem ocasionar decréscimos no IC, que são a disponibilidade hídrica e o suprimento de nitrogênio (DONALD e HAMBLIN, 1976). Tal fato foi observado no presente estudo, em que o DH ocasionou variações e diferentes impactos nos valores do IC, bem como no BIN, além da correlação positiva entre as duas características, como citado anteriormente. Iqbal et al. (2003), também verificaram correlações positivas de alta magnitude entre a produtividade e IC, NVPP, NGPV e PCG, como avaliado no presente estudo.

Os maiores efeitos diretos sobre a PROD obtidos pelo IC e A (análise de trilha - Tabela 13) indicam a possibilidade de seleção de genótipos de soja produtivos sob limitação hídrica através destas características. Tal relação está evidenciada na correlação

positiva de Pearson de alta magnitude entre essas características e a PROD. Toledo e Ovalle (2012) citam que o coeficiente de Pearson está entre -1 e 1, em que, quanto mais próximo de 1, mais perfeita é a correlação direta entre as características, e, quanto mais próximo de -1, ocorre perfeita correlação inversa. Já a mais perfeita correlação inversa obtida no presente estudo foi entre o ANT e o IC, que é um indicativo da PROD.

A correlação positiva do IC com as variáveis PROD, NVPP, PCG, A, e negativa com EUA (Tabela 11), evidencia a relação que estas características tem em relação à performance produtiva da soja sob condições de déficit hídrico. Também foi verificada correlação positiva entre A e as variáveis NVPP, NGPV, PCG, PROD, bem como com o IC. Deve ser salientado que estas variáveis apresentaram grande importância para o estudo, o que foi evidenciado pela análise de importância de caracteres.

Ainsworth et al. (2012) citam em seu estudo que, para se aumentar o potencial produtivo da soja existem alguns alvos, como a melhoria da eficiência fotossintética, permitindo a otimização da entrega e utilização do carbono, melhorar a fixação biológica de nitrogênio, bem como a alteração do início do florescimento e abortamento de flores. Estes alvos, como verificado no presente estudo, são de suma importância para um programa de melhoramento da cultura visando o desenvolvimento de cultivares com alta performance produtiva e resistentes ao déficit hídrico.

Com base na análise dos resultados da transpiração real obtidos ao longo de todo o ciclo da cultura, foi constatado que o período mais crítico da soja em relação ao déficit hídrico é o enchimento de grãos, o estágio fenológico R5. Já avaliando apenas o período vegetativo, o estágio V4 é a fase mais crítica em relação à limitação hídrica.

A partir do conhecimento destes dois períodos críticos da cultura da soja em relação à limitação hídrica, podem ser direcionados dois períodos para a aplicação da restrição hídrica para a seleção fenotípica visando à resistência da soja ao déficit hídrico. Neste sentido, serão apresentados a seguir, dois tipos de protocolos para a seleção fenotípica. Para tal, foram elencadas características fenotípicas estratégicas para cada situação e a limitação de água deve acontecer de maneira gradual, como realizada no presente estudo. As características foram selecionadas com base nos resultados dos testes de médias, e das análises dos parâmetros genéticos, importância de caracteres, correlações fenotípicas, correlações de Pearson e análise de trilha.

Os ganhos no potencial agrônômico e econômico da intensificação da produção de soja tem como ponto principal a resiliência e estabilidade produtiva de novas cultivares em detrimento dos desafios bióticos e abióticos (FOYER et al., 2019). Estratégias ótimas são aquelas que, por meio do manejo racional dos recursos naturais, como o solo e a água, possibilitam manter ou incrementar a resiliência e estabilidade dos sistemas de produção (BILLORE, DUPARE e SHARMA, 2018).

O primeiro protocolo foi denominado como seleção de impacto visando à resistência ao déficit hídrico em soja. Para tal, a imposição do déficit hídrico deverá acontecer gradualmente no estágio fenológico R5, sendo o enchimento de grãos o período mais crítico da cultura, como comprovado no presente estudo. As características fenotípicas elencadas para esse processo de seleção são os caracteres agrônômicos APM, NVPP, NGPV, PCG, IC e PROD, avaliados na maturidade fisiológica; e as características fisiológicas: A , g_s , q_L , E e EUA, medidos com um analisador de gases infravermelho (Li 6400XT, Li-Cor, Lincon, EUA) com fluorômetro acoplado; F_v/F_m , medido com um fluorômetro portátil (Marca: Fluorpen, Modelo: FP-100) e os índices de CL, FLAV, ANT e BIN, medidos com o equipamento Dualex® (Force-A, Orsay, France). As medições devem ocorrer no período da manhã (8h00min).

O segundo protocolo foi denominado como seleção precoce visando à resistência ao déficit hídrico em soja. A limitação hídrica gradual deverá ocorrer no estágio fenológico V4, fase crítica do período vegetativo da cultura, como constatado no presente estudo. As características fenotípicas elencadas para esse processo de seleção são A , g_s , E e EUA, medidos com um analisador de gases infravermelho (Li 6400XT, Li-Cor, Lincon, EUA) com fluorômetro acoplado, e os índices de CL, FLAV e ANT, medidos com o equipamento Dualex® (Force-A, Orsay, France). As medições devem ocorrer no período da manhã (8h00min).

Algumas observações importantes devem ser salientadas, que são as correlações fenotípicas positivas acima de 0,9 entre: IC com PCG, PROD com NVPP, PROD com PCG, A com PCG, A com PROD, E com PCG, E com PROD, E com A , A com PCG e PROD, e ANT com EUA; e as correlações fenotípicas negativas acima de 0,9 entre: q_L com A/E , CL com EUA, ANT com q_L , CL com EUA, e ANT com q_L . E também as correlações de Pearson, positivas acima de 0,9 entre: A com E , A com PROD, E com PROD, e EUA com ANT; e negativa acima de 0,9 entre: EUA com CL. Neste sentido,

além da resistência ao déficit hídrico, estes protocolos de seleção permitem também discriminar e selecionar indivíduos altamente produtivos nestas condições.

6 CONCLUSÕES GERAIS

Ambas as cultivares avaliadas no presente estudo apresentaram resistência e capacidade de resiliência ao déficit hídrico, mas com significativos impactos produtivos.

O déficit hídrico, desconsiderando outros fatores abióticos, ocasiona impactos significativos sobre o desempenho produtivo da soja e apresentando respostas fisiológicas distintas, principalmente na fase reprodutiva, em especial próximo do enchimento de grãos, estágio R5. Diante dos resultados apresentados no presente estudo, foi constatado que o estágio reprodutivo R5 é o período mais crítico ao déficit hídrico. E no período vegetativo, o período mais crítico à limitação hídrica é o estágio V4.

O primeiro protocolo foi denominado como seleção de impacto visando à resistência ao déficit hídrico em soja, com a imposição da limitação hídrica ocorrendo gradualmente no estágio fenológico R5. As características fenotípicas elencadas para esse processo de seleção são os caracteres agronômicos APM, NVPP, NGPV, PCG, IC e PROD; e as características fisiológicas: A , g_s , q_L , E , EUA, F_v/F_m , e os índices de CL, FLAV, ANT e BIN. O segundo protocolo foi denominado como seleção precoce visando à resistência ao déficit hídrico em soja, com a imposição da limitação hídrica ocorrendo gradualmente no estágio fenológico V4. As características fenotípicas elencadas para esse processo de seleção são A , g_s , E , EUA, e os índices de CL, FLAV e ANT.

Os equipamentos, analisador de gases infravermelho, fluorômetro portátil e Dualex®, utilizados nas avaliações fisiológicas, apresentam grande aplicabilidade em programas de melhoramento genético de soja visando resistência ao déficit hídrico. Estes, realizam a avaliação de técnicas não invasivas e não destrutivas, que possibilitam a avaliação de grande número de indivíduos em pouco tempo. Além dos resultados positivos obtidos no presente estudo de seus parâmetros fenotípicos.

7 REFERÊNCIAS

- AINSWORTH, E.A.; YENDREK, C.R.; SKONECZKA, J.A.; LONG, S.P. Accelerating yield potential in soybean: potential targets for biotechnological improvement. **Plant, Cell & Environment**, v.35, p.38-52, 2012.
- ALBRECHT, L.P., BRACCINI, A.D.L.E., ÁVILA, M.R., SUZUKI, L.S., SCAPIM, C.A.; BARBOSA, M.C. Teores de óleo, proteínas e produtividade de soja em função da antecipação da semeadura na região oeste do Paraná. **Bragantia**, 67(4), 865-873, 2008.
- ALMEIDA, L.A.; KIIHL, R.A.; MIRANDA, M.A.C.; CAMPELO, G.J.A. **Melhoramento da soja para regiões de baixas latitudes**. Embrapa Meio-Norte, 1999.
- ALMEIDA, L.A.; KIIHL, R.A.S.; Melhoramento de soja no Brasil-Desafios e Perspectivas. In: CAMARA, G.M.S. (Org). **Soja Tecnologia da produção**. Piracicaba: Publique, 1998. p.40-54.
- ALTHOFF, T.D.; SILVA, R.R.; MARTINS, J.C.; WANDERLEY, L.S.; SALES, A.T.; MENEZES, R.S. Simulation of aboveground biomass production under different rainfall scenarios and soil types in the Caatinga Biome, Brazil. **Revista Geama**, v.4, n.2, p.13-18, 2018.
- ARAUS, J.L.; SLAFER, G.A.; REYNOLDS, M.P.; ROYO, C. Plant breeding and water stress in C3 cereals: what to breed for? **Annals of Botany**, v.89, p.952-940, 2002.
- ARAUS, J.L.; SLAFER, G.A.; ROYO, C.; SERRET, M.D. Breeding for yield potential and stress adaptation in cereals. **Critical Reviews in Plant Science**, v.27, p.1-36, 2008.
- ASPINWALL, M.J.; LOIK, M.E.; RESCO DE DIOS, V.; TJOELKER, M.G.; PAYTON, P.R.; TISSUE, D.T. Utilizing intraspecific variation in phenotypic plasticity to bolster agricultural and forest productivity under climate change. **Plant Cell Environ**, v.38, p.1752–1764, 2015.
- BÄNZIGER, M.; EDMEADES, G.O.; BECK, D.L.; BELLON, M.R. **Breeding for drought and nitrogen stress tolerance in maize: from theory to practice** (pp. 68-pages). Cimmyt. 2000.
- BARBOSA, E.G.G. Overexpression of the ABA-Dependent AREB1 Transcription Factor from *Arabidopsis thaliana* Improves Soybean Tolerance to Water Deficit. **Plant Molecular Biology Reporter**, v.31, p.719–730, 2013.

BELLALOU, N.; GILLEN, A.M.; MENGISTU, A.; KEBEDE, H.; FISHER, D.K.; SMITH, J.R.; REDDY, K.N. Responses of nitrogen metabolism and seed nutrition to drought stress in soybean genotypes differing in slow-wilting phenotype. **Frontiers in Plant Science**, v.4, p.1-13, 2013.

BENNETT, E.M., CARPENTER, S.R.; GORDON, L.; RAMANKUTTY, N.; BALVANERA, P.; CAMPBELL, B.M.; CRAMER, W.; FOLEY, J.; FOLKE, C.; KARLBERG, L.; LIU, J., LOTZE-CAMPEN, H.; MUELLER, N.D.; PETERSON, G.D.; POLASKY, S.; ROCKSTRÖM, J.; SCHOLLES, R.J.; SPIERENBURG, M. Resilient thinking for a more sustainable agriculture. **The Solutions Journal**, v.5, n.5, 65-75, 2014.

BEZERRA, A.R.G. et al. Importância econômica. In: SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. (Eds.) **Soja – do plantio à colheita**. Viçosa, MG: Editora UFV, p.9-26. 2015.

BHERING, L.L. Rbio: A Tool For Biometric And Statistical Analysis Using The R Platform. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.17: 187-190p, 2017.

BILLORE, S.D.; DUPARE, B.; SHARMA, P. Addressing climate change impact on soybean through resilient technology. **Soybean Research**, v.16, p.01-24, 2018.

BILLORE, S.D.; DUPARE, B.; SHARMA, P. Addressing climate change impact on soybean through resilient technology. **Soybean Research**, v.16, p.01-24, 2018.

BLIGH, E. G.; DYER, W. J. A rapid method of total lipid extraction and purification. **Canadian Journal Biochemistry Physiological**, Ottawa, v. 27, n. 8, p. 911-917, 1959.

BLUM, A. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. **Field Crops Research**, v.112, p.119-123, 2009.

BORÉM, A.; RAMALHO, M.A.P. Estresses abióticos: desafios do melhoramento de plantas nas próximas décadas. In: FRITSCH-NETO, R.; BORÉM, A. **Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2011. p.9-28.

BRADFORD, M.M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, 72, 248-254, 1976.

CAMPOS, G.W.B. **Comportamento de variedades de soja submetidas ao estresse hídrico**. 2016. 60f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade de Rio Verde, Rio Verde, 2016.

CAMPOSTRINI, E. **Fluorescência da clorofila a: considerações teóricas e aplicações práticas**. Rio de Janeiro: UFNF, 2001. Disponível em:<
http://www.uenf.br/Uenf/Downloads/CENTRO_CCTA_1629_1112121492.pdf >
Acessado em: 12 jul 2019.

CARVALHO, P.E.R. **Espécies Florestais Brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira**. Colombo: Embrapa. 1994. 640 p.

CARVALHO, S.P.; CRUZ, C.D. Diagnosis of multicollinearity: assessment of the condition of correlation matrices used in genetic studies. **Brazilian Journal of Genetics**, v.19, p.479-484, 1996.

CASAGRANDE, E.C.; FARIAS, J.R.B.; NEUMAIER, N.O.R.M.A.N.; OYA, T.E.T.S.U.J.I.; PEDROSO, J.Ú.L.I.O.; MARTINS, P.K.; BRETON, M.C.; NEPOMUCENO, A.L. Expressão gênica diferencial durante déficit hídrico em soja. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.13, n.2, p.168-184, 2001.

CEREZINI, P.; FAGOTTI, D.D.S.L.; PÍPOLO, A.E.; HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M.A. Water restriction and physiological traits in soybean genotypes contrasting for nitrogen fixation drought tolerance. **Scientia Agrícola**, v.74, n.2, p.110-117, 2017.

CHAVES, M.M.; MAROCO, J.P.; PEREIRA, J.S. Understanding plant responses to drought — from genes to the whole plant. **Functional Plant Biology**, v.30, p. 239–264, 2003.

CHEN, D.; NEUMANN, K.; FRIEDEL, S.; KILIAN, B.; CHEN, M.; ALTMANN, T.; KLUKAS, C. Dissecting the phenotypic components of crop plant growth and drought responses based on high-throughput image analysis. **The Plant Cell**, v.26, n.12, p.4636-4655, 2014.

CHOWDHURY, J.A.; KARIM, M.A.; KHALIQ, Q.A.; AHMED, A.U.; KHAN, M.S.A. Effect of drought stress on gas exchange characteristics of four soybean genotypes. **Bangladesh Journal of Agricultural Research**, v.41, n.2, p.195-205, 2016.

COBER, E.R.; MORRISON, M.J. Soybean Yield and Seed Composition Changes in Response to Increasing Atmospheric CO₂ Concentration in Short-Season Canada. **Plants**, v.8, n.8, 13p., 2019.

CONAB. Companhia Brasileira de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. v. 4 Safra 2016/17 - Décimo levantamento, Brasília, 170p., 2017.

Disponível em: <

http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_07_11_09_00_42_boletim_graos_julho_2017.pdf> Acessado em: 11 Jul 2017.

CRUZ, C.D. GENES: software para análise de dados em estatística experimental e em genética quantitativa. **Acta Scientiarum. Agronomy**, 35, 271-276 2013.

CRUZ, C.D. **Princípios de genética quantitativa**. Viçosa, MG: UFV, 2005. 394p.

CRUZ, C.D.; CARNEIRO, P.C.S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 2. ed. Viçosa: UFV, v.2. 2006.

CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J.; CARNEIRO, P.C.S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2004. 480 p.

DAHAL, K.; MARTYN, G.D.; VANLERBERGHE, G.C. Improved photosynthetic performance during severe drought in *Nicotiana tabacum* overexpressing a nonenergy conserving respiratory electron sink. **New Phytologist**, v.208, p.382-395, 2015.

DAVIDSON, J.L.; DONALD, C.M. The growth of swards of subterranean clover with particular reference to leaf area. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.9, n.1, p.53-72, 1958.

DHONDT, S.; WUYTS, N.; INZÉ, D. Cell to whole-plant phenotyping: the best is yet to come. **Trends in Plant Science**, v.18, p.428-439. 2013.

DIERS, B.W.; SPECHT, J.; RAINEY, K.M.; CREGAN, P.; SONG, Q.; RAMASUBRAMANIAN, V.; GRAEF, G.; NELSON, R.; SCHAPAUGH, W.; WANG, D.; SHANNON, G. MCHALE, L.; KANTARTZI, S.K.; XAVIER, A.; MIAN, R.;

STUPAR, R.M.; MICHNO, J.; AN, Y.C.; GOETTEL, W.; WARD, R.; FOX, C.; LIPKA, A.E.; HYTEN, D.; CARY, T.; SHANNON, G. Genetic architecture of soybean yield and agronomic traits. **G3: Genes, Genomes, Genetics**, v.8, n.10, p.3367-3375, 2018.

DINAKAR, C.; DJILIANOV, D.; BARTELSA, D. Photosynthesis in desiccation tolerant plants: Energy metabolism and antioxidative stress defense. **Plant Science**, v.182, p.29-41, 2012.

DONALD, C.M.; HAMBLIN, J. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. **Advances in Agronomy**, v.28, p.351-405, 1976.

FANG, Y.; XIONG, L. General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. **Cellular and Molecular Life Sciences**, v.72, p.673–689, 2015.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. (Circular técnica, n. 48).

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames, Yowa: Yowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service, 1977. 11 p. (Special Report, n. 80).

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.

FERRARI, E.; PAZ, A.; SILVA, A.C. Déficit hídrico no metabolismo da soja em semeaduras antecipadas no Mato Grosso. **Nativa**, v.3, n. 1, p.67-77, 2015.

FLETCHER, A.L.; SINCLAIR, T.R.; ALLEN, L.H. Transpiration responses to vapor pressure deficit in well watered ‘slow-wilting’ and comercial soybean. **Environmental and Experimental Botany**, v.61, p.145–151, 2007.

FOLKE, C.; CARPENTER, S.R.; WALKER, B.; SCHEFFER, M.; CHAPIN, T.; ROCKSTROM, J. Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability. **Ecology and Society**, v.15, 9p., 2010.

FOROUD, N.; MÜNDEL, H.H.; SAINDON, G.; ENTZ, T. Effect of level and timing of moisture stress on soybean yield, protein, and oil responses. **Field Crops Research**, v.31, p.195-209, 1993.

FOYER, C.H.; LAM, H.M.; NGUYEN, H.T.; SIDDIQUE, K.H.; VARSHNEY, R.K.; COLMER, T.D.; COWLING, W.; BRAMLEY, H.; MORI, T.A.; HODGSON, J.M.; COOPER, J.W.; MILLER, A.J.; KUNERT, K.; VORSTER, J.; CULLIS, C.; OZGA, J.A.; WAHLQVIST, M.L.; LIANG, Y.; SHOU, H.; SHI, K.; YU, J.; FODOR, N.; WONG, F.L.; VALLIYODAN, B.; CONSIDINE, M.J. Neglecting legumes has compromised human health and sustainable food production. **Nature Plants**, v.2, artigo 16112, 10p., 2016.

FRACASSO, A.; TRINDADE, L.M.; AMADUCCI, S. Drought stress tolerance strategies revealed by RNA-Seq in two sorghum genotypes with contrasting WUE. **BMC Plant Biology**, v.16, 18p., 2016.

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

FURBANK, R.T.; TESTER, M. Phenomics—Technologies to Relieve the Phenotyping Bottleneck. **Trends in Plant Science**, v.16, p.635-644, 2011.

GAVA, R.; FRIZZONE, J.A.; SNYDER, R.L.; JOSE, J.V.; FRAGA JUNIOR, E.F.; PERBONI, A. Estresse hídrico em diferentes fases da cultura da soja. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.9, n.6, p.349-359, 2015.

GAVILI, E.; MOOSAVI, A.A.; HAGHIGHI, A.A.K. Does biochar mitigate the adverse effects of drought on the agronomic traits and yield components of soybean? **Industrial Crops and Products**, v.128, 445-454, 2019.

GHANEM, M.E.; MARROU, H.; SINCLAIR, T.R. Physiological phenotyping of plants for crop improvement. **Trends in Plant Science**, v.20, n.3, p.139-144, 2015.

GILBERT, M.E.; ZWIENIECKI, M.A.; HOLBROOK, N.M. Independent variation in photosynthetic capacity and stomatal conductance leads to differences in intrinsic water use efficiency in 11 soybeans genotypes before and during mild drought. **Journal of Experimental Botany**, v.62, p.1-13, 2011.

GURURANI, M.A., VENKATESH, J.; TRAN, L.S.P. (2015). Regulation of photosynthesis during abiotic stress-induced photoinhibition. **Molecular plant**, v.8, n.9, p.1304-1320, 2015.

GUTIERREZ-GONZALEZ, J.J.; GUTTIKONDA, S.K.; TRAN, L.S.P.; ALDRICH, D.L.; ZHONG, R.; YU, O.; NGUYEN, H.T.; SLEPER, D.A. Differential expression of isoflavone biosynthetic genes in soybean during water deficits. **Plant and Cell Physiology**, v.51, n.6, 936-948, 2010.

HASANAHA, Y.; NISA, T.C.; ARMIDIN, H.; HANUM, H. Isoflavone content of soybean [*Glycine max* (L). Merr.] cultivars with different nitrogen sources and growing season under dry land conditions. **Journal of Agriculture and Environment for International Development**, v.109, p.5-17, 2015.

HEINEMANN, A.B.; STONE, L.F.; FAGERIA, N.K. Transpiration rate response to water deficit during vegetative and reproductive phases of upland rice cultivars. **Scientia Agricola**, v.68, p.24-30, 2011.

HONG-BO, S. B.; LI-YE, C.; JALEEL, C. A.; CHANG-XING, Z. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. **Comptes Rendus Biologies**, v.331, n.3, p.215-225, 2008.

HONNA, P.T.; FUGANTI-PAGLIARINI, R.; FERREIRA, L.C.; MOLINARI, M.D.C.; MARIN, S.R.R.; OLIVEIRA, M.C.N.; FARIAS, J.R.; NEUMAIER, N.; MERTZ-HENNING, L.M.; KANAMORI, N.; NAKASHIMA, K.; TAKASAKI, H.; URANO, K.; SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; DESIDÉRIO, J.A.; NEPOMUCENO, A.L. Molecular, physiological, and agronomical characterization, in greenhouse and in field conditions, of soybean plants genetically modified with AtGolS2 gene for drought tolerance. **Molecular Breeding**, 36, 17p., 2016.

HU, H.; XIONG, L. Genetic engineering and breeding of drought-resistant crops. **Annual Review of Plant Biology**, v.65, p.715–741, 2014.

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J.C.; CAMPO, R.J.; CRISPINO, C.C.; MORAES, J.Z.; SIBALDELLI, R.N.R.; MENDES, I.C.; ARIHARA, J. Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: contributions of biological N₂ fixation and of N fertilizer to grain yield. **Canadian Journal of Plant Science**, n.86, p.927-939, 2006.

- IQBAL, N.; HUSSAIN, S.; RAZA, M.A.; YANG, C-Q.; SAFDAR, M.E.; BRESTIC, M.; AZIZ, A.; HAYYAT, M.S.; ASGHAR, M.A.; WANG, X.C.; ZHANG, J.; YANG, W. LIU, J. Drought tolerance of soybean (*Glycine max* L. Merr.) by improved photosynthetic characteristics and an efficient antioxidant enzyme activities under a split-root system. **Frontiers in Physiology**, v.10, 13p., 2019.
- IQBAL, S.; MAHMOOD, T.; MUHAMMAD, T.A.; MUHAMMAD, A.; MUHAMMAD, S. Path coefficient analysis in different genotypes of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill). **Pakistan Journal of Biological Science**, v.12, p.1085-1087, 2003.
- ISLAM, M.S.; HAQUE, M.M.; KHAN, M.M., HIDAKA, T.; KARIM, M.A. Effect of fertilizer potassium on growth, yield and water relations of bushbean (*Phaseolus vulgaris* L.) under water stress conditions. **Japanese Journal of Tropical Agriculture**, v.48, p.1-9, 2004.
- JORDAN, W. R. Whole plant response to water deficits: An overview. In: TAYLOR, H. M. et al. (Eds.) **Limitations to efficient water use in crop production**. Madison: ASA, CSSA, and SSA. 1983. p.289-317.
- KING, C.A.; PURCELL, L.C.; BOLTON, A.; SPECHT, J.E. 2014. A possible relationship between shoot N concentration and the sensitivity of N₂ fixation to drought in soybean. **Crop Science**, v.54, p.746-756, 2014.
- KINNEY, A.J.; CLEMENTE, T.E. Modifying soybean oil for enhanced performance in biodiesel blends. **Fuel processing technology**, v.86, n.10, p.1137-1147, 2005.
- KRAMER, P.J.; BOYER, J.S. **Water relations of plants and soils**. Academic Press, San Diego. 1995.
- LENG, G.; ZHANG, X.; HUANG, M.; ASRAR, G.R.; LEUNG, L.R. The Role of Climate Covariability on Crop Yields in the Conterminous United States. **Scientific Reports**, v.6, 33160, 11p., 2016.
- LEVITT, J. **Responses of plants to environmental stresses. Volume II. Water, radiation, salt, and other stresses**. Academic Press., 1980. 2ed. 620p.
- LICHT, M.A.; WRIGHT, D.; LENSSEN, A.W. **Soybean response to drought**. 2013. Iowa State University: Agriculture and Environment Extension Publications. 190.

Disponível em: <http://lib.dr.iastate.edu/extension_ag_pubs/190> Acessado em: 18 Jun 2017.

LIM, C.W.; BAEK, W.; JUNG, J.; KIM, J.H.; LEE, S.C. Function of ABA in stomatal defense against biotic and drought stresses. **International journal of molecular sciences**, v.16, n.7, p.15251-15270, 2015.

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

MACEDO, M.C.M. Degradação de pastagens: conceitos, alternativas e métodos de recuperação. Informe Agropecuário, 26, 36-42, 2005.

MANAVALAN, L.P.; GUTTIKONDA, S.K.; PHAN TRAN, L.S.; NGUYEN, H.T. Physiological and molecular approaches to improve drought resistance in soybean. **Plant and Cell Physiology**, v.50, n.7, p.1260-1276, 2009.

MAXWELL, K.; JOHNSON, G.N. Chlorophyll fluorescence—a practical guide. **Journal of Experimental Botany**, v.51, n.345, p.659-668, 2000.

MONTGOMERY, D.C.; PECK, E.A. Introduction to linear regression analysis. New York : J. Wiley, 1981. 504p.

MORCELI, T.G.S.; TREVISOLI, S.H.U.; MORCELI JUNIOR, A.A.; KIIHL, R.A.S.; CALVO, E.S.; DI MAURO, A.O.; GARCIA, A. Identificação e validação de marcadores microssatélites ligados ao gene *Rpp5* de resistência à ferrugem asiática da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, n.11, p.1525-1531, 2008.

NADEEM, M.; LI, J.; YAHYA, M.; SHER, A.; MA, C.; WANG, X.; QIU, L. Research progress and perspective on drought stress in legumes: A review. **International Journal of Molecular Sciences**, v.20, n.10, p.2541, 2019.

NAGASUGA, K.; KADOWAKI, M.; UCHIDA, S.; KAJI, H.; FUKUNAGA, A.; UMEZAKI, T. Effects of Water Condition on Soybean (*Glycine max* L.) Plant Growth After Flowering. **Environmental Control Biology**, v.52, n.4, p.221-225, 2014.

NAKABAYASHI R.; YONEKURA-SAKAKIBARA, K.; URANO, K.; SUZUKI, M. YAMADA, Y.; NISHIZAWA, T.; MATSUDA, F.; KOJIMA, M.; SAKAKIBARA, H.; SHINOZAKI, K.; MICHAEL, A.J.; TOHGE, T.; YAMAZAKI, M.; SAITO, K.

Enhancement of oxidative and drought tolerance in Arabidopsis by overaccumulation of antioxidant flavonoids. **The Plant Journal**, v.77, n.3, p.367-379, 2014.

NISHIYAMA, Y., MURATA, N. Revised scheme for the mechanism of photoinhibition and its application to enhance the abiotic stress tolerance of the photosynthetic machinery. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v.98, p.8777-8796, 2014.

OYA, T.; NEPOMUCENO, A.L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J.R.B.; TOBITA, S.; ITO, O. Drought tolerance characteristics of Brazilian soybean cultivars. **Plant Production Science**, v.7, n.2, p.129-137, 2004..

PAGANO, M.C.; MIRANSARI, M. **The importance of soybean production worldwide. In Abiotic and biotic stresses in soybean production.** Academic Press. p.1-26, 2016.

PALTA, J.A.; KOBATA, T.; TURNER, N.C.; FILLERY, I.R. et al. Remobilization of carbon and nitrogen in wheat as influenced by postanthesis water deficits. **Crop Science**, v.34, n.1, p.118-124, 1994.

PEIRONE, L.S.; PEREYRA IRUJO, G.; BOLTON, A.; ERREGUERENA, I.; AGUIRREZABAL, L.A. Assessing the efficiency of phenotyping early traits in a greenhouse automated platform for predicting drought tolerance of soybean in the field. **Frontiers in Plant Science**, v.9, p.587, 2018.

Polizel A.M.; Medri, M.E.; Nakashima, K.; YAMANAKA, N.; FARIAS, J.R.B.; OLIVEIRA, M.C.N.; MARIN, S.R.R.; ABDELNOOR, R.V.; MARCELINO-GUIMARÃES, F.C.; FUGANTI, R.; RODRIGUES, F.A.; STOLF-MOREIRA, R.; BENEVENTI, M.A.; ROLLA, A.A.P.; NEUMAIER, N.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; CARVALHO, J.F.C.; NEPOMUCENO, A.L. Molecular, anatomical and physiological properties of a genetically modified soybean line transformed with rd29A:AtDREB1A for the improvement of drought tolerance. *Genet Mol Res* 10:3641–3656. **Genetics and Molecular Research**, v.10, n.4, p.3641-3656, 2011.

PRINCE, S.J. Evaluation of high yielding soybean germplasm under water limitation. **Journal of Integrative Plant Biology**, v.58, n.5, p.475-491, 2016.

PRINCE, S.J.; MURPHY, M.; MUTAVA, R.N.; ZHANG, Z.; NGUYEN, N.; KIM, Y.H.; PATHAN, S.M.; SHANNON, G.J.; VALLIYODAN, B.; NGUYEN, H.T.

Evaluation of high yielding soybean germplasm under water limitation. **Journal of Integrative Plant Biology**, v.58, n.5, p.475-491, 2016.

QIN, X.; FENG, F.; LI, D.; HERBERT, S.J.; LIAO, Y.; SIDDIQUE, K.H.M. Changes in yield and agronomic traits of soybean cultivars released in China in the last 60 years. **Crop and Pasture Science**, v.68, n.11, p.973-984, 2017.

RAIJ, B. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Boletim Técnico do Instituto Agronômico de Campinas, n.100, 1997. 285p.

RAMALHO, M.A.; SANTOS, J.B.; ZIMMERMANN, M.J.O. **Genética quantitativa em plantas autógamas: aplicações ao melhoramento do feijoeiro**. Goiânia, GO: Ed. UFG, 1993, 271p.

RAMALHO, M.A.P.; ABREU, Â.F.B.; SANTOS, J.B.; NUNES, J.A.R. **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas**. Lavras, MG: Ed. UFLA, 2012. 522p.

RAPER, C.D.; KRAMER, P.J. Stress Physiology. In: WILCOX, J.R. (Ed.) **Soybeans: Improvement, production, and uses**. American Society of Agronomy, Madison, p.589-641, 1987.

REZENDE, P.M.; ARRUDA CARVALHO, E. Avaliação de cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill] para o sul de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v.31, n.6, p.1616-1623, 2007.

RIBAUT, J.M.; PILET, P.E. Water stress and indol-3yl-acetic acid content of maize roots. **Planta**, v.193, p.502-507, 1994.

RICHETTI, J.; JOHANN, J.A., DE SOUZA ROLIM, G.; URIBE-OPAZO, M.A.; BECKER, W.R. Calibração do índice de colheita (Cc) para estimativa de produtividade atingível da cultura da soja. **Anais... XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR**. 2015.

RIOS, S.A.; BORÉM, A.; GUIMARÃES, P.E.O.; PAES, M.C.D. Análise de trilha para carotenoides em milho. **Revista Ceres**, v.59, p.368-373, 2012.

ROCHA, M.M.; CAMPELO, J.E.G.; FREIRE FILHO, F.R.; RIBEIRO, V.Q. Estimativas de parâmetros genéticos em genótipos de feijão-caupi de tegumento branco. **Revista Científica Rural**, v.08, n.1, p.135-141, 2003.

ROSE, G.; OSBORNE, T.; GREATREX, H.; WHEELER, T. Impact of progressive global warming on the global-scale yield of maize and soybean. **Climate Change**, v.134, p.417-428, 2016.

ROSENZWEIG, C.; PARRY, M.L. Potential impact of climate change on world food supply. **Nature**, v.367, p.133–138, 1994.

ROTUNDO, J. L.; WESTGATE, M. E. Meta-analysis of environmental effects on soybean seed composition. **Field Crops Research**, v.110, n.2, p.147–156, 2009.

SANTOS, E.L.; CATTELAN, A.J.; PRETE, C.E.C.; NEUMAIER, N.; OLIVEIRA, M. C.N.; FARIAS, J.R.B.; CARVALHO, J.F.C.; NEPOMUCENO, A.L. Water stress affecting nodulation, oil, protein and grain yield of soybean cultivars. **Global Science and Technology**, v.05, n.02, p.109-120, 2012.

SCHMIDHUBER, J., TUBIELLO, F.N. Global food security under climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.104, p.19703–19708, 2007.

SEDIYAMA, T. (Ed.). **Tecnologias de produção e usos da soja**. Londrina: Mecenas. 309p. 2009.

SEVERSIKE, T.M.; SERMONS, S.M.; SINCLAIR, T.R.; CARTER, T.E.; RUFTY, T.W. Physiological properties of a drought-resistant wild soybean genotype: Transpiration control with soil drying and expression of root morphology. **Plant and Soil**, v.374, p.359-370, 2014.

SEVERSIKE, T.M.; SERMONS, S.M.; SINCLAIR, T.R.; CARTER, T.E.; RUFTY, T.W. Physiological properties of a drought-resistant wild soybean genotype: Transpiration control with soil drying and expression of root morphology. **Plant and Soil**, v.374, p.359-370, 2014.

SEVERSIKE, T.M.; SERMONS, S.M.; SINCLAIR, T.R.; CARTER, T.E.JR.; RUFTY, T.W. Temperature interactions with transpiration response to vapor pressure deficit among cultivated and wild soybean genotypes. **Plant Physiology**, v.148, p. 62-73, 2013.

SHAFI-UR-REHMAN; HARRIS, P.J.C.; ASHRAF, M. Stress environments and their impact on crop production. In: ASHRAF, M.; HARRIS, P.J.C. (Eds.) **Abiotic Stress –**

plant resistance through breeding and molecular approaches. New York: Food Products Press. 715p. 2005.

SHOWKAT, M.; TYAGI, D. Correlation and path analysis of some quantitative traits in soybean (*Glycine max* L. Merrill). **Research Journal of Agricultural Sciences**, v.1, p.102-106, 2010.

SILVA, É.D.B. **Estimando a produtividade na cultura da soja**. 2015. Disponível em: <<http://www.pioneersementes.com.br/blog/46/estimando-a-produtividade-na-cultura-da-soja>> Acessado em: 26 Jul 2017.

SINCLAIR, T.R. Challenges in breeding for yield increase for drought. **Trends in Plant Science**, v.16, n.6, p.289-293, 2011.

SINGH, D. The relative importance of characters affecting genetic divergence. **Indian Journal of Genetic and Plant Breeding**, v.41, n.2, p.237-245, 1981.

Songsri, P.; Jogloy, S.; Holbrook, C.C.; Kesmala, T.; Vorasoot, N.; Akkasaeng, C.; Patanothai, A. (2009). Association of root, specific leaf area and SPAD chlorophyll meter reading to water use efficiency of peanut under different available soil water. **Agricultural Water Management**, v.96, n.5, p.790-798, 2009.

SOUSA, M.B.; SILVA, K.J.D.; ROCHA, M.M.; NEVES, A.C. Estimativas de parâmetros genéticos em linhagens de feijão-caupi nos municípios de Balsas, MA e Primavera do Leste, MT. In: CONGRESSO NACIONAL DE FEIJÃO-CAUPI, 3., 2013, Recife. **Anais...** Recife: CONAC, 2013. 4p.

SPEHAR, C. R.; MONTEIRO, P. M. F. O.; ZUFFO, N. L. Melhoramento genético da soja na região Centro-Oeste. In: ARANTES, N. A.; SOUSA, P. I. DE M. de (Ed.). **Cultura da soja nos cerrados**. Piracicaba: Potafos, 1993. p.229- 253.

SPEHAR, C.R. Breeding soybeans to the low latitudes of Brazilian Cerrados (Savannahs). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.29, n.8, p.1167- 1180, 1994.

STEEL, R.G.D.; TORRIE, J.H.; DICKEY, D.A **Principles and procedures of statistics: a biometrical approach**. New York: McGrawHill Book, 1997. 666p.

SYNGENTA, 2019. **Portal Syngenta: Sementes Soja - Vtorial IPRO**. Disponível em: < <https://www.portalsyngenta.com.br/sementes-soja-vtorial-ipro> > Acessado em 21 nov 2019.

THIRY, A.A.; CHAVEZ DULANTO, P.N.; REYNOLDS, M.P.; DAVIES, W.J. How can we improve crop genotypes to increase stress resilience and productivity in a future climate? A new crop screening method based on productivity and resistance to abiotic stress. **Journal of Experimental Botany**, v.67, n.19, p.5593-5603, 2016.

THOMAS, H.; HOWARTH, C.J. Five ways to stay green. **Journal of Experimental Botany**, v.51, p.329-337, 2000.

TOLEDO, G.L.; OVALLE, I.I. **Estatística Básica**. 2ed. São Paulo: Atlas, 2012.

TRAN, L-SP; NISHIYAMA, R., YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K.; SHINOZAKI, K. Potential utilization of NAC transcription factors to enhance abiotic stress tolerance in plants by biotechnological approach. **GM Crops**, v.1, p.32–39, 2010.

TUBEROSA, R.; SANGUINETI, M.C.; LANDI, P. Abscisic acid concentration in the leaf nad xylem sap, leaf water potential, and stomatal conductance in drought-stressed maize. **Crop Science**, v.34, p.1557-1563, 1994.

TURNER, N.C. Adaptation to water deficits: A changing perspective. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.13, n.1, p.175-190, 1986.

TURNER, N.C. Further progress in crop water relations. **Advances in Agronomy**, v.58, p.293-338,1997.

URBEN FILHO, G.; SOUZA, P.I.M. Manejo da cultura da soja sob cerrado: época, densidade e profundidade de semeadura. In: ARANTES, N.E.; SOUZA, P.I.M. (Ed.). **Cultura da soja nos cerrados**. Piracicaba: Potafos, 1993. p.267-298.

VADEZ, V.; KHOLOVA, J.; MEDINA, S.; KAKKERA, A.; ANDERBERG, H. Transpiration efficiency: new insights into an old story. **Journal of Experimental Botany**, v.65, n.21, p.6141-6153, 2014.

VALLIYODAN, B.; NGUYEN, H.T. Understanding regulatory networks and engineering for enhanced drought tolerance in plants. **Current Opinion in Plant Biology**, v.9, n.2, p.189-195, 2006.

VENCOVSKY, R.; BARRIGA, P. **Genética biométrica no fitomelhoramento.**

Ribeirão Preto, SP: SBG, 496p. 1992.

VITAL, R.G.; COSTA, A.C.; MÜLLER, C.; MOURA, L.D.F.; BATISTA, P.F.; SILVA, F.B. Alterações morfológicas em cultivares de soja submetidas ao déficit hídrico. **Abstract...** IV INOVAGRI International Meeting, 2017. Fortaleza, 2 a 6 out. 2017.

VOLTAS, J.; LOPEZ-CORCOLES, H.; BORRAS, G. Use of biplot analysis and factorial regression for the investigation of superior genotypes in multienvironment trials. **European Journal of Agronomy**, v.22, p.309-324, 2005.

WU, Z.; ZHANG, Y. Effects of exogenous auxin on physiological and biochemical characteristics of soybean under PEG simulated drought stress. **Hubei Agricultural Sciences**, v.58, n6, p.16-19, 2019.

ZHANG, J.; LIU, J.; YANG, C.; DU, S.; YANG, W. Photosynthetic performance of soybean plants to water déficit under high and low light intensity. **South African Journal of Botany**, v.105, p.279-287, 2016.