

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA
CENTRO DE ESTUDOS SUPERIORES DE BALSAS – CESBA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE – PPGAA

NIEDJA BEZERRA COSTA

ECOFISIOLOGIA E EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA DE CULTIVARES DE SOJA

BALSAS – MA

2019

NIEDJA BEZERRACOSTA

ECOFISIOLOGIA E EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA DE CULTIVARES DE SOJA

Dissertação de Mestrado apresentada no Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente – PPGAA/CESBA/UEMA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agricultura e Ambiente.
Orientador: Prof. Dr. Tiago Massi Ferraz

Balsas – MA

2019

Costa, Niedja Bezerra.

Ecofisiologia e eficiência do uso da água de cultivares de soja / Niedja Bezerra Costa. – Balsas, 2019.

59 f.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente, Centro de Estudos Superiores de Balsas – CESBA, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Massi Ferraz.

1. Trocas gasosas. 2. *Glycine max*. 3. Fluorescência da clorofila.

I. Título.

CDU 633.34

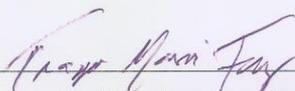
NIEDJA BEZERRA COSTA

ECOFISIOLOGIA E EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA DE CULTIVARES DE SOJA

Dissertação de Mestrado apresentada no Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente – PPGAA/CESBA/UEMA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agricultura e Ambiente.
Orientador: Prof. Dr. Tiago Massi Ferraz

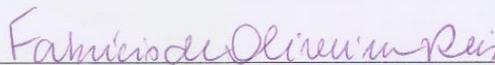
Aprovada em: 28/02/2019.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Tiago Massi Ferraz

(Orientador)



Prof. Dr. Fabrício de Oliveira Reis

Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)



Prof. Dr. Sávio da Silva Berilli

Instituto Federal do Espírito Santo (IFES)

*Aos meus pais, Virgulino e Neudinila, à
minha avó Terezinha (in memoriam), a
minha vida Hugo, aos meus irmãos,
Nadja e Nildson, aos meus amigos
Fátima e Diego, por sempre acreditarem
em mim, transmitindo confiança,
paciência e admiração.*

Dedico com carinho.

O tempo passou e eu mudei.

Mudei porque cresci.

Mudei porque passei por tantas e tão diversas experiências, que consegui aprender com meus próprios erros.

Mudei porque me decepcionei com amigos.

Mudei porque conheci pessoas tão especiais que fui capaz de me inspirar por elas e me espelhar nelas para me tornar uma pessoa diferente, talvez uma pessoa melhor.

O tempo passou, eu mudei e nem todos, me acompanharam.

Mas valeu a pena!

Autoria desconhecida

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, por sempre estar ao meu, por iluminar meu caminho e me dar forças para não desistir diante dos desafios e nunca abrir mão dos meus sonhos. Ensinando-me a fazer dos obstáculos motivos para vencer.

Aos meus pais e irmãos, por sempre terem acreditado em mim, permitindo-me a realização deste sonho. Pelo incentivo e apesar das dificuldades que apareceram durante este caminho, nunca terem permitido que eu abrisse mão dessa realização. E por terem me dado à coisa mais importante que os pais dão aos filhos, educação.

Ao meu marido, minha vida, meu companheiro de todas as horas, que assumiu a responsabilidade de aguentar todas as minhas loucuras durante essa caminhada. Por nunca me deixar sozinha e nunca desistir. Pela sua companhia nas noites em claras de estudos. Por segurar minhas mãos durante as minhas ansiedades e impaciências. Por sempre estar comigo do começo ao fim das minhas jornadas.

A Universidade Estadual do Maranhão e Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente, pela oportunidade da realização deste curso.

A FAPEMA, pela concessão da bolsa de estudos e auxílio ao projeto.

Ao meu orientador, Prof. Tiago, pela paciência e disponibilidade, por todo conhecimento compartilhado, apoio e confiança.

Aos meus amigos, Fátima e Diego, por tudo! Precisaria escrever outra dissertação para agradecer tudo que vocês fizeram por mim. Pelo companheirismo incondicional. Por sempre me ajudarem. Pelas madrugadas de sono perdidas. E por todos os abraços.

A Equipe Soja é Agro (Fátima, Edson, Fernando, Letícia, Diego, Iza e Gustavo) sem vocês o trabalho de campo não seria possível, nem tão divertido.

A Fazenda Bola Branca, Daniel, Hércules e Levy, pela infraestrutura para o experimento, bem como, a disponibilidade e assistência em campo.

A Prof^a Anatórcia, da UEMASUL, pela disposição do Laboratório de Sementes.

Ao Prof. Heder Braun, do setor de Nutrição Mineral de Plantas, por permitir a realização das análises químicas de nitrogênio em seu laboratório. E a disponibilidade de seus orientandos para me auxiliarem nas análises.

Além disso, desejo expressar os meus sinceros agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta realização.

Meu muito obrigada!!!

RESUMO

Os repetidos eventos de escassez hídrica vêm comprometendo as safras de soja ao redor do mundo, o que impacta diretamente o abastecimento alimentar. Os fatores ambientais que mais exercem efeitos sobre o desenvolvimento da cultura da soja são a umidade, temperatura e fotoperíodo. As avaliações do desempenho ecofisiológico das plantas permitem entender o comportamento dos parâmetros fisiológicas, bem como as respostas no rendimento produtivo das culturas. Essas avaliações, evidenciam a importância de trabalhos em condições de campo para o desenvolvimento de novos sistemas de manejo, no sentido de reduzir os riscos de perda de produção em função, principalmente, da climatologia local. Diante disso, este estudo teve como objetivo caracterizar os parâmetros ecofisiológico das cultivares de soja e determinar a eficiência do uso da água e produtividade em condições de campo no município de Açailândia-MA. Foram utilizadas três cultivares (CS01, CS02 e CS03), avaliadas durante os estádios V5 e R5. Sendo os parâmetros fisiológicos: assimilação fotossintética de CO₂, transpiração, condutância estomática, índice SPAD, Fv/Fm e índice fotossintético. Com os valores das trocas gasosas, foram determinadas a eficiência do uso da água (EUA) e eficiência intrínseca do uso da água (EIUA). Além disso, foram obtidas as biomassas e componentes de produção. As cultivares de soja estudadas apresentaram comportamentos similares de assimilação de CO₂, transpiração e condutância estomática, bem como satisfatória atividade fotoquímica. A CS02 obteve melhor desempenho nas variáveis de crescimento: diâmetro de caule, massa da matéria seca da parte aérea e raízes, índice de qualidade de Dickson e relação MSR/MSPA. Apresentando destaque também, na relação Fv/Fm, índice fotossintético, índice SPAD e eficiência no uso de nitrogênio. Sendo a mais eficiente no uso da água e que obteve melhor aproveitamento da água precipitada durante o ciclo, com os maiores valores para eficiência instantânea, intrínseca e agrônômica do uso da água. Nas avaliações dos componentes agrônômicos a CS02 teve desempenho superior as demais cultivares para número total de vagens e grãos, e produtividade. Sendo assim, esta cultivar apresentou melhores estratégias fisiológicas para as condições climáticas que estava exposta.

Palavras-chave: trocas gasosas, *Glycine max*, fluorescência da clorofila.

ABSTRACT

The repeated events of water scarcity have been jeopardizing soybean crops around the world, which directly impacts food supply. The environmental factors that most exert effects on the development of the soybean crop are humidity, temperature and photoperiod. The evaluations of the ecophysiological performance of the plants allow to understand the behaviour of the physiological parameters, as well as the responses in the productive yield of the cultures. These evaluations show the importance of working in field conditions for the development of new management systems, in order to reduce the risks of loss of production, mainly due to the local climatology. The objective of this study was to characterize the ecophysiological parameters of soybean cultivars and to determine the efficiency of water use and productivity in field conditions in the municipality of Açailândia-MA. Were three cultivars (CS01, CS02 and CS03) evaluated during the V5 and R5 stages were used. The physiological parameters were: photosynthetic assimilation CO_2 , transpiration, stomatal conductance, SPAD index, F_v/F_m and photosynthetic index. With gas exchange values, were determined water use efficiency (WUE) and water use efficiency intrinsic (WUEi). In addition, biomass and production components were obtained. The studied soybean cultivars presented similar behaviour of CO_2 assimilation, transpiration and stomatal conductance, as well as satisfactory photochemical activity. The CS02 obtained better performance in the growth variables: stem diameter, dry matter mass of the area and roots, Dickson quality index and MSR / MSPA ratio. Also showed prominence in the relation F_v/F_m , photosynthetic index, SPAD index and efficiency in the use of nitrogen. Was the most efficient in the use of water and got better use of water precipitated during the cycle, with the highest values for instantaneous, intrinsic and agronomic efficiency of water use. In the evaluations of the agronomic components CS02 had superior performance to the other cultivars for total number of pods and grains, and productivity. Therefore, this cultivar presented better physiological strategies for the climatic conditions that were exposed.

Keywords: gas exchange, *Glycine max*, chlorophyll fluorescence.

LISTA DE SIGLAS

A: Assimilação fotossintética de CO₂

ATP: Adenosina trifosfato

CNPA: Conteúdo de nitrogênio da parte aérea

CO₂: Dióxido de carbono (gás carbônico)

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento

CS01: Cultivar 1

CS02: Cultivar 2

CS03: Cultivar 3

DAP: Dias após o plantio

DPV: Déficit de pressão de vapor

E: Transpiração

EAUA: Eficiência agrônômica do uso da água

EIUA: Eficiência intrínseca do uso da água

EUA: Eficiência do uso da água

EUN: Eficiência do uso do nitrogênio

F₀: Fluorescência inicial

F_m: Fluorescência máxima

F_v/F_m: Rendimento quântico máximo do fotossistema II

F_v: Fluorescência variável

GM: Grupo de maturação

g_s: Condutância estomática

IQD: Índice de qualidade de Dickson

IRGA: Analisador de gás a infravermelho

MAPA: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MFE: Massa foliar específica

MSPA: Massa da matéria seca da parte aérea

MSR: Massa da matéria seca de raízes

MST: Massa da matéria seca total

NADPH: Nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato desidrogenase

NTG: Número total de grãos

NTV: Número total de vagens

PI: Índice fotossintético

PMG: Peso de mil grãos

PSII: Fotossistema II

Qa: Quinona *a*

R5: Estádio reprodutivo 5

USDA: Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

V5: Estádio vegetativo 5

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Características climáticas: precipitação, umidade relativa - UR, e temperaturas (A); Déficit de pressão de vapor – DPV_{ar} (B) e Radiação fotossinteticamente ativa (C). Setas pretas: indicam primeira campanha fisiológica no estádio V5; Setas cinzas: indicam segunda campanha fisiológica no estádio R5..... 42
- Figura 2** – Altura (A), diâmetro (B), massa da matéria seca da parte aérea - MSPA (C), massa da matéria seca de raiz – MSR (D), massa da matéria seca total – MST (E), Relação MSR/MSPA (F), Massa foliar específica (G) e Índice de qualidade de Dickson (H). Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Cada ponto representa a média de 30 plantas..... 43
- Figura 3** – Assimilação fotossintética de CO_2 – A (A), transpiração - E (B) e condutância estomática - g_s (C). V5: estádio vegetativo e R5: estádio reprodutivo – enchimento de grãos. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Cada ponto representa a média de 30 plantas..... 44
- Figura 4** – Rendimento quântico máximo do fotossistema II (A), índice fotossintético (B), índice SPAD (C) e eficiência no uso de nitrogênio (D). V5: estádio vegetativo e R5: estádio reprodutivo – enchimento de grãos. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Cada ponto representa a média de 30 plantas..... 45
- Figura 5** – Eficiência no uso da água – A/E (A e B), eficiência intrínseca no uso da água – A/g_s (C e D), razão de transpiração (E), e eficiência agrônômica no uso da água – EAU (F). V5: estádio vegetativo e R5: estádio reprodutivo – enchimento de grãos. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)..... 47
- Figura 6** – Número total de vagens – NTV (A), número total de grãos – NTG (B), peso de mil grãos (C), e produtividade (D). Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)..... 48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atributos químicos e físicos do solo da área experimental no município de Açailândia/MA.....	38
Tabela 2 - Resumo da análise de variância e coeficientes de variação das características avaliadas em três cultivares de soja.....	55
Tabela 3 – Valores médios das características avaliadas em três cultivares de soja.....	57

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo geral	16
2.2 Objetivos específicos	16
CAPÍTULO 1 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Origem e histórico da soja	17
2.2 Características gerais	18
2.3 Importância econômica da cultura da soja	19
2.4 Parâmetros fisiológicos	20
2.5 Eficiência do uso da água	23
2.6 Eficiência no uso do Nitrogênio	25
2.7 Aspectos da produtividade	26
REFERÊNCIAS	29
CAPÍTULO 2 – ECOFISIOLOGIA E EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA DE CULTIVARES DE SOJA EM CONDIÇÕES DE CAMPO	36
RESUMO	36
INTRODUÇÃO	37
MATERIAL E MÉTODOS	38
RESULTADOS	41
VARIÁVEIS CLIMÁTICAS	41
VARIÁVEIS DE CRESCIMENTO	42
TROCAS GASOSAS	44
EFICIÊNCIA FOTOQUÍMICA	44
EFICIÊNCIA NO USO DO NITROGÊNIO	45
EFICIÊNCIA NO USO DA ÁGUA	46
COMPONENTES DE PRODUÇÃO E PRODUTIVIDADE	47
DISCUSSÃO	48
CONCLUSÕES	51
REFERÊNCIAS	52
APÊNDICE A – Análises de variância	55
APÊNDICE B – Testes de comparação de médias	57

1 INTRODUÇÃO GERAL

A base para a produção de alimentos, energia e renda no Brasil e no mundo é a agricultura. Devido aos repetidos eventos de escassez hídrica estão ocorrendo maiores perdas de safra ao redor do mundo, o que compromete o abastecimento alimentar. Sendo assim, o aumento da produtividade e a estabilidade do rendimento das culturas são vitais para enfrentar o desafio da expansão populacional e o consequente aumento pela demanda por alimentos e fibras (Comas et al. 2019).

A cultura da soja (*Glycine max* L.) tem grande importância agrícola, no cenário nacional e internacional. No Brasil, a cultura é destaque, pois é a mais cultivada, com maior produção de grãos e volume de exportação. Com isso, muitas cultivares estão disponíveis no mercado, e a escolha daquelas que melhor se adaptam a uma determinada região leva em consideração suas condições edafoclimáticas, que são preponderantes para um bom rendimento (Copetti, 2014; Gava et al. 2018).

A adaptação de espécies aos efeitos das mudanças no clima pode ajudar no manejo da água em condições de diferente umidade, razão pela qual o uso da água reflete a complexidade de fatores envolvidos na interação planta-ambiente (Silva et al. 2004).

Os fatores ambientais que mais exercem efeitos sobre o desenvolvimento da soja são a umidade, temperatura e fotoperíodo. A temperatura tem influência em todas as fases fenológicas da soja, quando elevadas encurtam o período de florescimento, e este efeito pode ser mais acentuado em dias curtos. Além disso, a maturação das vagens é acelerada em decorrência de altas temperaturas (Embrapa, 2006). Segundo Guimarães et al. (2008), a temperatura de fato, influencia diretamente no rendimento de grãos e em outras características da planta de soja. Sendo que, temperaturas baixas podem provocar atrasos nas diferentes fases, resultando na redução da produção.

Por causa das respostas às variações no fotoperíodo, as plantas de soja são altamente sensíveis a mudanças entre latitudes ou datas de semeadura. Em regiões tropicais, os dias mais curtos durante a período de crescimento da soja reduzem o estágio vegetativo (florescimento precoce) e provocam limitações na altura das plantas e, portanto, na produtividade (Rocha, 2009).

Guimarães et al. (2008) apontam que o rendimento de uma cultura é definido pela interação entre genótipo, ambiente de produção e gerenciamento. Contudo, a escolha da melhor cultivar pode nem sempre resultar em rendimentos elevados, conforme relatado por Gava et al.

(2015) que observaram que o déficit hídrico é um fator que deve ser levado em consideração no manejo da safra, pois pode causar uma redução drástica no rendimento quando ocorre durante o ciclo ou mesmo no enchimento de grãos.

Diferentes níveis de água no solo influenciam o crescimento e a produção de grãos e conforme a cultivar adotada, o efeito da disponibilidade de água se torna mais significativo (Souza et al. 2017). Dependendo do local e época do ano, principalmente no Nordeste brasileiro, as condições de cultivo das espécies são consideradas adversas, com a ocorrência de deficiência de água associada a altas temperaturas, o que requer estratégias de produção onde a água atua como fator limitante (Ramos et al. 2012). Logo, em ambientes que sujeitos a restrição hídrica a situação é ainda mais crítica, sendo o estresse hídrico, o principal responsável por reduzir a produtividade de biomassa em todo o mundo (Turner e Rao, 2013).

Conforme Kerbauy (2008), o crescimento e a produtividade das plantas são promovidos pela fotossíntese, e a produtividade depende da interceptação da luz e, conseqüentemente, da área foliar. Por sua vez, em geral, a fotossíntese é proporcional à área foliar. Por exemplo, o teor de clorofila na folha, a eficiência do uso de água e a produtividade de grãos são parâmetros que podem ser utilizados para auxiliar na identificação de materiais tolerantes ao déficit hídrico (Schaffert et al. 2011; Bacelar et al. 2012).

Desse modo, avaliações do desempenho ecofisiológico das plantas permite entender o comportamento dos parâmetros fisiológicas (condutância estomática, transpiração, fotossíntese e temperatura foliar), bem como as respostas no rendimento produtivo. Essas avaliações, evidenciam a importância de trabalhos em condições de campo, para o desenvolvimento de novos sistemas de manejo, no sentido de reduzir os riscos de perda de produção em função, principalmente, da climatologia local (Nascimento et al. 2011).

Outro importante parâmetro dos vegetais é a eficiência do uso da água, que caracteriza a ligação dos ciclos da água e carbono. Compreender os mecanismos fisiológicos envolvidos nessa propriedade, e ser capaz de prever seu comportamento em um ambiente de constantes mudanças é um desafio a ser vencido (Knauer et al. 2017).

Dentro desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento ecofisiológico de plantas de soja cultivadas na região Oeste do estado do Maranhão. Observando, como as condições ambientais interferiram no crescimento e desenvolvimento das cultivares, e determinar qual apresentou a melhor eficiência do uso da água e maior produtividade agrícola.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Caracterizar os parâmetros ecofisiológico das cultivares de soja e determinar a eficiência do uso da água e produtividade em condições de campo no município de Açailândia-MA.

2.2 Objetivos específicos

Comparar as cultivares de soja com relação à:

- a) Medidas de trocas gasosas: assimilação fotossintética de CO₂, condutância estomática e transpiração;
- b) Parâmetros fotoquímicos: eficiência quântica máxima do fotossistema II e índice fotossintético;
- c) Índice SPAD e eficiência do uso de nitrogênio;
- d) Parâmetros de crescimento: altura das plantas e diâmetro do colo.
- e) Componentes de rendimento e produção: massa da matéria seca de planta e raízes, número total de vagens e grãos, peso de mil grãos, e produtividade.
- f) Eficiência do uso da água: instantânea, intrínseca e agrônômica.

CAPÍTULO 1 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Origem e histórico da soja

Originária do continente asiático, mais especificamente Nordeste da China (1700 a 1100 a.C.), a soja teve sua disseminação na Europa a partir de 1730, com fins ornamentais. No continente americano, o primeiro registro da cultura data de 1765, nos Estados Unidos da América, país pioneiro no cultivo extensivo da soja. Em 1917, com a industrialização para fabricação do farelo de soja e extração do óleo vegetal a produção aumentou. E na década de 70, os Estados Unidos tornaram-se os produtores de dois terços da soja produzida mundialmente (Hartman et al. 2011).

No Brasil, as primeiras experiências com a cultura foram relatadas no estado da Bahia em 1882 (Bonato, 1987), e em 1908 no estado de São Paulo, com a introdução através dos imigrantes japoneses (Conceição, 1986). Contudo, a cultura era inicialmente cultivada em pequenas propriedades com característica de agricultura familiar, sua expansão e elevação a categoria comercial ocorreu a partir da 1950, com a chamada Revolução Verde (Kreutz et al. 2014).

A soja encontrou no Brasil excelentes condições para uma rápida expansão. A produção, apesar das oscilações ocorridas em razão de problemas climáticos, foi crescendo de maneira rápida, especialmente até 1980. Nas regiões Centro-Oeste e Nordeste do país a cultura começou a crescer no início da década de 70, tomando um significativo impulso principalmente a partir da safra 1976/77. No ano agrícola de 1984/85, essas regiões foram responsáveis por 33,49% da área colhida e 36,27% da produção total (Bonato, 1987).

O cultivo comercial da soja no Estado do Maranhão foi iniciado no ano agrícola de 1977/78, um ano após o início das pesquisas com a cultura. A produção localizou-se no cerrado das Chapadas do Sul Maranhense, tendo como centro a região de Balsas. A fixação definitiva da cultura da soja, no estado, deve-se muito ao pioneirismo do Sr. Leonardus Philipsen e à atuação do Banco do Nordeste S.A., que apoiou o Plano de Difusão da Cultura da Soja no Nordeste do Brasil, elaborado em 1981 (Embrapa, 1981; Bonato, 1987).

2.2 Características gerais

Segundo Sedyama (2009), a soja pertence ao reino *Plantae*, divisão *Magnoliophyta*, classe *Magnoliopsida*, ordem *Fabales*, família *Fabaceae* (Leguminosae), Subfamília *Faboideae* (Papilionoideae), gênero *Glycine*, espécie *Glycine max* e forma cultivada *Glycine max* (L.) Merrill.

É uma planta anual, herbácea, ereta, autógama, que apresenta variabilidade nas características morfológicas, podendo ser influenciada por diversas condições ambientais. Sendo que, os fatores climáticos são os que mais alteram o seu desenvolvimento, especialmente, a disponibilidade hídrica, temperatura e fotoperíodo (Rodrigues et al., 2001; Sedyama, 2009). Apresenta também, grande variabilidade genética, tanto no período vegetativo, que compreende da emergência da plântula até a abertura das primeiras flores, como no reprodutivo, do início da floração até o fim do ciclo da cultura (Thomas e Costa, 2010).

Conforme Neumaier et al. (2000), quanto ao fotoperíodo, a soja é considerada uma planta de dias curtos, com resposta quantitativa e não absoluta, ou seja, o florescimento ocorre mesmo com condições de dia longo, tornando-se mais rápido à medida que os dias se tornam mais curtos, podendo variar entre as cultivares.

A soja possui três tipos de crescimento: determinado, semideterminado e indeterminado, estes se diferenciam pelo crescimento da haste principal, isto é, o quanto a planta pode crescer após a floração. Plantas com tipo de crescimento determinado não emitem novos nós no caule após o florescimento, podendo aumentar em estatura devido ao alongamento entre os nós, e normalmente mantém o padrão de tamanho das folhas. No tipo indeterminado, há continuidade de emissão de novos nós no caule após o florescimento e as folhas do ápice do caule apresentam tamanho menor do que as do terço médio e inferior. O tipo semideterminado tem características “intermediárias” aos crescimentos anteriores, de acordo com a descrição do ARS (*Agricultural Research Service*) (2018) do USDA (*United States Department of Agriculture*) (Thomas, 2018).

No Brasil, com base no ciclo da cultura as cultivares de soja são classificadas em grupos de maturação (GM). Estes variam de acordo com a latitude e são classificados por uma numeração de 0 (mais próximo dos polos) a 10 (mais próximo do Equador), separando as cultivares em grupos de acordo com sua região de melhor adaptação em função das respostas ao fotoperíodo. Por exemplo: cultivares do GM 6.0 são mais precoces que do Grupo 7.0; assim como, a do Grupo 9.2 é mais tardia que a do Grupo 8.0. Um décimo de unidade no GM representa aproximadamente dois dias de variação no ciclo da cultura (Decicino, 2015).

2.3 Importância econômica da cultura da soja

A soja é a principal oleaginosa cultivada no mundo, e faz parte do conjunto de atividades agrícolas com maior destaque no mercado mundial. O grão e seus derivados são usados em diversas áreas. A exemplo do farelo que é amplamente utilizado, e é um dos pilares na alimentação animal, principalmente de aves e bovinos. Enquanto o óleo extraído do grão é destinado para consumo humano e produção de gorduras hidrogenadas. Apesar de sua importância no cenário mundial, cerca de 83% da produção mundial de soja tem se limitado a três países: Estados Unidos, Brasil e Argentina com 34, 31 e 18%, respectivamente (USDA, 2017).

A crescente demanda mundial por alimentos abriu oportunidade para o Brasil competir internacionalmente no mercado das exportações de commodities. Para isso, a agricultura brasileira teve que desenvolver tecnologias de expansão das fronteiras produtivas. O que permitiu que culturas, em especial a da soja, ganhasse grande escala, levando o país ao patamar de potência agrícola mundial (Mantovani, 2017).

O complexo soja (grão, farelo e óleo) é o principal gerador de divisas cambiais do Brasil. Em 2019, a produção nacional deve representar 40% do comércio mundial do grão e 73% do óleo de soja (MAPA, 2016).

A produção mundial de soja na safra 2017/2018 chegou a 339,46 milhões de toneladas, com área total plantada de 120.958 milhões de hectares (USDA, 2018). Segundo relatório do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) em nível global, a produção de soja para a safra 2018/2019 deve ser de 369 milhões de toneladas, aumento de 0,55% com relação à safra anterior.

O Brasil, segundo maior produtor mundial do grão, produziu 113,923 milhões de toneladas, em uma área de 33.890 milhões de hectares, com produtividade de 3.362 kg ha⁻¹ (CONAB, 2018). As estimativas para a safra 2017/2018 são boas, as condições climáticas têm favorecido a elevação da produção de soja, estimada em 111,56 milhões de toneladas, com o crescimento previsto na área de 3,3% em relação ao ano passado, atingindo 35.022,8 mil hectares (CONAB, 2018).

Na Região Norte-Nordeste, o comportamento da safra passada (2017/18), com um quadro climático favorável, serviu de estímulo aos produtores, que pretendem ampliar a área plantada. Com perspectiva de incremento de 1,8% em relação aos 5.195,2 mil hectares, plantados no período anterior. No Maranhão, segundo maior produtor do Nordeste, as condições climáticas, sobretudo o volume acumulado de precipitações pluviométricas,

favoreceram o estabelecimento relativamente seguro das lavouras de soja no estado. Com isso, permanece a estimativa de plantio do último levantamento, de aproximadamente 970,5 mil hectares e produção de 3.013 mil toneladas. Em relação à produtividade, a estimativa é que seja em torno de 3.105 kg ha⁻¹ (CONAB, 2018).

2.4 Parâmetros fisiológicos

Estresses abióticos, como o déficit hídrico dos solos e a elevação da temperatura média global, são as principais causas primárias que podem afetar negativamente a produtividade de culturas em todo o mundo (Quaderi et al., 2012). Esses fatores comprometem e influenciam, direta ou indiretamente, processos fisiológicos como a fotossíntese, em relação ao uso dos recursos primários como água, temperatura, luz, CO₂ e nutrientes, e logo, as taxas de crescimento (Morais et al. 2017).

A combinação de altas temperaturas foliares e estresse hídrico podem reduzir drasticamente o crescimento e desenvolvimento das plantas, afetando negativamente as taxas de assimilação de CO₂, processo que tem uma alta demanda de água, e devido ao mecanismo de fechamento dos estômatos as plantas não só reduzem as perdas de água, como também reduzem o suprimento de CO₂ para as folhas e, conseqüentemente, a produção de biomassa é comprometida (Silva et al. 2013; Moraes et al. 2017).

A condutância estomática (g_s) responde às mudanças no déficit de pressão de vapor entre a folha e o ar (DPV). De maneira geral os estômatos fecham à proporção que o DPV aumenta (Lloyd et al., 1995, Marengo e Lopes, 2009). Assim, na ausência de restrição hídrica, a alta umidade do ar e o aumento da temperatura dentro de uma faixa moderada (23-28°C) levam a um aumento da condutância do mesófilo, atividade da Rubisco e do transporte de elétrons e como resultado aumenta a condutância dos estômatos via efeito de retroalimentação da concentração de CO₂ intercelular na abertura dos estômatos (Warren, 2008).

A dependência de processos fotossintéticos em relação às condições ambientais é importante para a agricultura, pois a produtividade vegetal e, em consequência, a produtividade das culturas agrícolas dependem muito das taxas fotossintéticas prevalentes em um ambiente dinâmico. Dessa forma, há necessidade de compreender as respostas diretas da fotossíntese a fatores ambientais como luz, concentrações de CO₂ e temperatura, bem como as respostas indiretas (mediadas por efeitos do controle estomático) a fatores como umidade do ar e umidade do solo (Taiz et al., 2017).

Bezerra (2000) avaliando trocas gasosas em cultivares de soja submetidas a déficit hídrico e déficit de fósforo, constatou que quando submetidas a restrição hídrica as plantas apresentaram redução da assimilação de CO₂ (A), de 10,45 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para 0,54 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, indistintamente do nível de fósforo utilizado no solo. Grande parte dessa redução pode ser atribuída a limitações estomáticas, visto que, independentemente do nível de fósforo, a condutância estomática (g_s) mostrou-se menor sob condições de déficit hídrico e havendo correlação significativamente positiva entre g_s e A .

Lopes (2017), pesquisando sobre trocas gasosas em genótipos de soja, observou os valores máximos do DPV (4,5 KPa) às 12h mostrando que houve uma elevada demanda transpiratória sobre as folhas dos genótipos estudados. Visto que, sob elevados valores de DPV, as plantas tendem a transpirar mais, condição que pode reduzir a temperatura foliar, e a perda de água para o ambiente torna-se mais intensa, o que pode afetar o fechamento estomático, e reduzir os valores de A .

Um dos fatores ligados à eficiência fotossintética de plantas, crescimento e à adaptabilidade a diversos ambientes é o conteúdo de clorofila. Este que, nas folhas frequentemente é utilizado para estimar o potencial fotossintético das plantas, devido sua ligação direta com a absorção e transferência de energia luminosa. Uma planta com alta concentração de clorofila é capaz de atingir taxas fotossintéticas mais altas, pelo seu valor potencial de captação de quanta na unidade de tempo (Rêgo e Possami, 2004).

A determinação dos teores de clorofila é necessária pois a atividade fotossintética da planta depende em parte, da capacidade da folha absorver luz, visto que o teor de clorofila nas folhas é influenciado por diversos fatores bióticos e abióticos, sendo diretamente relacionado com o potencial da atividade fotossintética das plantas. Portanto, sua quantificação é interessante no estudo de práticas culturais e de manejo, visando aumentar o potencial fotossintético e o rendimento das espécies (Salla et al, 2007).

A energia luminosa é absorvida pelas clorofilas, e transferidas para o aparato fotossintético, e sua quantificação pode fornecer informações preciosas sobre o comportamento fisiológico das folhas (Lins, 2017). Para avaliar o desempenho dessa absorção pelas plantas, a utilização de clorofila e pigmentos fotossintéticos é de suma importância. Sob condições de estresse, os teores de pigmentos que constituem o complexo antena, podem ser reduzidos levando a um déficit na absorção de energia de luz (Bouchenak et al., 2012; Shu et al., 2013).

O estudo da fluorescência da clorofila a é uma ferramenta muito útil em avaliações ecofisiológicas para analisar o desempenho fotossintético das plantas sob estresses bióticos e

abióticos, relacionando os efeitos dos fatores ambientais sobre os processos fisiológicos em plantas (Campostrini, 2001; Melo et al. 2017).

A fluorescência da clorofila é um parâmetro confiável, preciso e não destrutivo, e permite inferências sobre o estado fisiológico da planta como um todo em segundos (Flood et al. 2016). Possibilita analisar quali e quantitativamente a absorção e o aproveitamento da energia luminosa através do fotossistema II (PSII) e suas possíveis relações com a capacidade fotossintética (Baker, 2008; Azevedo Neto et al. 2011). Além disso, mudanças no PSII têm sido amplamente utilizadas para determinar e quantificar o efeito de fatores ambientais em plantas, por exemplo para estresses osmóticos (Esmailpour et al. 2015), baixa temperatura (Hurry et al. 1992, Devacht et al. 2009) e outros fatores ambientais (Baker e Rosenqvist, 2004).

De acordo com Santos et al. (2010), as medidas de trocas gasosas são significativas para determinar as taxas fotossintéticas, porém podem não ser eficientes para avaliar os efeitos deletérios nos cloroplastos; desta maneira e segundo esses autores, a avaliação da fluorescência da clorofila revela o nível de excitação da energia que dirige a fotossíntese e fornece subsídios para estimar a inibição ou o dano no processo de transferência de elétrons do PSII.

O rendimento quântico do fotossistema II é definido pela relação F_v/F_m . Em que, F_v denota a fluorescência variável e F_m a fluorescência máxima, $F_v = (F_m - F_0) / F_m$, sendo F_0 a fluorescência inicial da folha adaptada ao escuro. A relação F_v/F_m reflete a proporção de energia luminosa absorvida pelas clorofilas (no fotossistema II) que é utilizada no transporte de elétrons (Bjorkman e Demmig, 1987; Marenco et al., 2015).

Além da relação F_v/F_m , outra variável importante para o diagnóstico da atividade fotoquímica nas plantas é o índice fotossintético (PI). Esse parâmetro, integra três componentes independentes: a densidade dos centros de reação ativos (RCs), a eficiência no transporte de elétrons após Quinona *a* (Qa) ter sido reduzida e a probabilidade de que um fóton absorvido seja capaz de reduzir Qa. Por isso, é considerada uma variável mais completa que F_v/F_m , avaliando a atividade dos fotossistemas II e I, possibilitando estudar o desempenho da planta sob condição de estresse (Strasser et al. 2000; Couto et al. 2014).

Chavarria et al. (2015), avaliando a restrição fotossintética de plantas de soja sob variação de disponibilidade hídrica, constataram que, níveis de potenciais de água no solo de até -0,164MPa não são suficientes para resultar em degradação de pigmentos fotossintéticos para a cultivar estudada; contudo, na avaliação da fluorescência máxima da clorofila (F_m), houve diferença significativa entre os tratamentos, havendo um incremento de 23,37% na F_m , com a redução do potencial hídrico de -0,006 para -0,164 MPa. Demonstrando que, de acordo

com os resultados, foi possível observar que as plantas buscaram uma dissipação de energia em função do déficit hídrico.

No trabalho de Lopes (2017), observou-se que as maiores reduções em g_s as 12h podem causar uma maior taxa de fotoinibição (relação entre os valores de F_v/F_m), pois, sob esta condição, pode ocorrer menor disponibilidade de CO_2 para os sítios de carboxilação da Rubisco. Dessa forma, com a menor disponibilidade de CO_2 e com maior radiação fotossintética ativa (PAR), esperava-se uma maior excitação das moléculas de clorofila. Esta maior excitação das moléculas de clorofila, sem o consumo de NADPH pelo ciclo de Calvin (velocidade reduzida pela redução no consumo de CO_2 limitado por g_s 12h) poderia refletir em um maior dano ao PSII, o qual seria evidenciado nos valores de F_v/F_m . Contudo, este processo não foi observado.

Paixão (2018) constatou, a partir dos resultados de concentração de clorofilas reduzidos, que inicialmente, enquanto a folha não estava totalmente desenvolvida, foram observados os menores valores de F_v/F_m e PI, evidenciando que em folhas mais jovens a maquinaria fotoquímica não está completamente desenvolvida. E, à medida que as folhas cresceram, os valores de intensidade de cor verde aumentaram e as folhas apresentaram maior eficiência fotoquímica, mostrada por meio da relação F_v/F_m e PI.

2.5 Eficiência do uso da água

Os estômatos são vias de entrada para as trocas gasosas de CO_2 , e também a via de saída da água, na forma de vapor, do interior para o exterior da folha. Para absorver CO_2 do meio externo, a planta, inevitavelmente, acaba perdendo água e, quando diminui esta perda, também restringe a entrada de CO_2 . Essa interdependência é expressa numericamente pela razão global entre a assimilação e o consumo de água. A relação entre as taxas de fotossíntese e transpiração pode ser expressa pela sua razão, resultando assim na eficiência do uso da água (EUA) (Larcher, 2004).

Uma vez que as trocas gasosas são reguladas pelo movimento estomático, a absorção de CO_2 externo depende de uma maior transpiração, principalmente nas plantas C3. Assim, a redução na transpiração limita a entrada de carbono na câmara substomatal. Portanto, as plantas precisam ter maior eficiência do uso da água, ou seja, absorver o máximo de CO_2 possível, com perda mínima de água (Jesus et al., 2018).

Segundo Taiz e Zeiger (2004), o estresse hídrico moderado tende a reduzir primeiramente g_s antes de reduzir a taxa fotossintética, assim, é possível que a planta assimile mais moléculas de CO_2 para cada unidade de água transpirada, sendo mais eficiente na utilização da água disponível. A EUA está associada à essa capacidade da planta em assimilar maiores concentrações de carbono limitando a perda de água por meio do controle da abertura e fechamento estomático (Silva et al., 2006).

Esse parâmetro chave reflete múltiplas funções dos ecossistemas, sendo utilizado para quantificar a relação entre a produtividade obtida por uma cultura sob determinado volume de água aplicado (Costa et al., 2012). Tendo grande utilidade para alcançar uma gestão sustentável dos recursos hídricos e serviços ecossistêmicos no contexto da mudança climática global (Alves, 2017).

Entender a dinâmica sazonal da EUA pode melhorar o conhecimento da relação entre os ciclos de carbono e água durante o crescimento vegetal. Fatores como, conteúdo de água no solo, déficit de pressão de vapor, índice de área foliar e a concentração de CO_2 podem variar a eficiência do uso da água (Zhu et al., 2014).

O avanço nas pesquisas sobre eficiência do uso da água pelas culturas é uma das principais abordagens adotadas para superar os impactos da redução da disponibilidade de água para a agricultura. Otimizar a quantidade de água utilizada no sistema de produção é um dos grandes desafios no uso da irrigação, tanto do ponto de vista econômico, quanto ambiental (Teixeira et al., 2017).

Portanto, vários autores têm entendido a relevância de selecionar culturas com maior EUA e tolerância à seca, ou produção de biomassa mediante as condições climáticas futuras. Isso, devido ao prolongamento nos períodos de estiagem, que podem reduzir as chuvas e comprometer a demanda hídrica pelas culturas (Santos et al. 2017). Diversos autores encontraram em diferentes espécies que a redução na condutância estomática ocasionou um aumento na eficiência do uso intrínseco da água, especialmente, em condições de baixa disponibilidade de água no solo, como em pinhão-manso (Sapeta et al. 2013) e soja (Gilbert et al. 2011).

Firmino et al. (2009) observaram em seus resultados que, de forma geral, os valores da EUA das plantas de soja submetidas a deficiência hídrica diminuíram, indicando que estas estariam sob uma restrição hídrica mais severa. Comportamento este, em função de um aumento da resistência em relação à difusão do CO_2 no mesófilo, diminuindo a eficiência de carboxilação.

Logo, a EUA sempre mudará quando as condições para a difusão do CO₂ ou da H₂O forem alteradas. Quando os estômatos estão totalmente abertos, a absorção de CO₂ é mais limitada pela resistência de transferência do que a perda d'água por transpiração. Sendo que, a melhor relação entre absorção de CO₂ e de perda de H₂O, é alcançada quando os estômatos estão parcialmente fechados (Larcher, 2004).

Segundo Rosa et al. (2017), valores mais altos na EUA caracterizam plantas tolerantes a situações de restrição hídrica. Além disso, os autores reiteram que este parâmetro, serve como indicativo da plasticidade fisiológica das plantas em relação aos fatores abióticos. Sendo a eficiência do uso da água, o retrato da capacidade das espécies de se adaptar às adversidades ambientais.

Dessa forma, a EUA vem sendo utilizada para diversos fins dentro das pesquisas científicas. Como exemplo, para a seleção de cultivares (Mantovani et al. 2013), ajuste de programas de irrigação (Tan e Zheng, 2019), otimização no manejo de sistemas de irrigação (Murga-Orrillo et al. 2016), entre outros. Trabalhos como o de Knauer et al. (2016), que estudam a eficiência do uso da água diante das concentrações de CO₂, são relevantes diante do aumento contínuo, ao longo dos anos, das concentrações de gás carbônico, tendo interferência direta nas trocas gasosas (Knauer et al. 2016).

2.6 Eficiência no uso do Nitrogênio

O nitrogênio (N) é um dos macronutrientes essenciais necessários para o crescimento e o desenvolvimento das plantas. A disponibilidade do N geralmente limita os rendimentos das plantas na maioria dos sistemas de cultivo agrícola. É o nutriente mais difícil de ser manejado nos solos de regiões tropicais e subtropicais, em virtude do grande número de reações a que está sujeito, tornando-se crítico quando se tem em mente o rendimento de grãos esperado e a composição deste rendimento (Luo et al., 2018).

A capacidade fotossintética das plantas está diretamente ligada ao metabolismo do N, pois o nitrogênio presente nas folhas, aloca-se nas proteínas envolvidas no processo fotossintético. Além disso, a fotossíntese depende de vários compostos nitrogenados para a produção dos compostos de carbono que compõem a biomassa vegetal. A falta de N no metabolismo das plantas tem corroborado a afirmação de que o N é um dos nutrientes que mais tem restringido o aumento de rendimentos das culturas, especialmente nos trópicos (Paixão, 2018).

A eficiência no uso do nitrogênio (EUN) é um caractere fenotípico complexo influenciado por vários mecanismos fisiológicos da planta. A absorção de nitrogênio tem sido correlacionada com o aumento do rendimento através de vários fatores fisiológicos, incluindo: aumento da biomassa vegetal, arquitetura radicular, fotossíntese, índice de área foliar, teor de nitrato, glutamina sintetase, Rubisco, PEP carboxilase e asparagina (Mastrodomenico et al. 2018).

De acordo com Moll et al. 1982, a EUN é definida como a produção de grãos por unidade de N disponível no solo. Sendo dividida em dois componentes: (i) eficiência de absorção (planta total N/N fornecido), que é a capacidade de o cultivo para extrair N do solo; e (ii) eficiência de utilização (UTE) (rendimento de grãos/conteúdo total de N por planta), que mede a capacidade da planta para converter o N já absorvido na planta em rendimento de grãos. A eficiência do uso de nitrogênio e a adaptação das plantas a regimes de nutrientes menos favoráveis são complexas com vários fatores envolvidos (Ranjitha et al. 2018).

A EUN vêm sendo estudada em diversas culturas como, soja (Serra et al. 2010), milho (Mastrodomenico et al. 2018) e trigo (Todeschini et al. 2016). Procópio et al. (2004), avaliando a eficiência do uso de N pelas plantas de feijão e soja, não verificaram diferença significativa entre as duas culturas, apresentando valores de 33 e 37 g MS g⁻¹ N, para feijão e soja, respectivamente.

Segundo Todeschini et al. (2016), a EUN é um caractere importante na produção de sustentável de grãos, podendo ainda ser utilizada na seleção indireta de cultivares mais eficientes no aproveitamento desse nutriente. Os autores, analisando a EUN em cultivares de trigo, concluíram que a eficiência de uso do nitrogênio pelas cultivares avaliadas decorreu basicamente, da eficiência destas em remobilizar o nitrogênio absorvido para a produção de grãos, sendo a cultivar que obteve melhor EUN apresentado média de 58,55 g MS g⁻¹ N.

2.7 Aspectos da produtividade

As alterações fisiológicas decorrentes das constantes variações climáticas, provocam alterações nas propriedades das membranas celulares, aumento da respiração, inibição da fotossíntese, menor produção de matéria seca, senescência prematura e redução na produção e seus componentes (Bacelar et al. 2012; Arruda et al. 2015). A produção de soja é diretamente afetada pelos estresses ambientais, podendo-se citar o aumento da concentração de

ozônio (Morgan et al. 2006), temperaturas elevadas (Strauss et al. 2007), déficit hídrico (Gutierrez-Gonzalez et al. 2010) e inundações (Wuebker et al. 2001).

Assim como, nas demais espécies, a produtividade na cultura da soja é determinada pela interação entre o genótipo, o ambiente e o manejo. Elevadas produtividades são obtidas quando combinados, estádios de crescimento da planta com ambiente climático favorável à expressão da cultivar utilizada (Rocha, 2009). De acordo com Medeiros et al. (1991) e Câmara (1998), as causas dos baixos níveis de rendimentos de grãos podem ser atribuídas ao fator de aptidão climática e edáfica da região, devido a exposição permanece a diversos fatores externos, durante o ciclo da cultura, que podem favorecer ou prejudicar a produção final.

A água é o principal fator que altera a produtividade da soja no tempo e no espaço. A baixa disponibilidade hídrica prejudica a uniformidade na população de plantas, acarretando ainda alterações fisiológicas como o fechamento estomático e o enrolamento de folhas. Como consequência, há queda prematura de folhas e flores, e abortamento de vagens, resultando em redução no rendimento de grãos (Bonato, 2000).

A temperatura afeta a planta de soja desde a germinação até o florescimento, age diretamente no rendimento, porte da planta, altura de inserção da primeira vagem e em outras características. Temperaturas mais elevadas podem provocar florescimento precoce, distúrbios na frutificação e acelerar a maturação dos grãos, ocasionando reduções na produção (Rodrigues et al. 2001; Guimarães et al. 2008).

Não é comum a existência de relação positiva entre produtividade e taxa de fotossíntese, nem que a seleção para taxa de fotossíntese tenha resultado em maior produtividade. A incoerência da não correlação entre produtividade e taxa de fotossíntese pode ser explicado através da análise quantitativa do crescimento (índice de colheita) e da eficiência de conversão. Portanto, a mesma taxa fotossintética acarreta taxa de crescimento inversamente proporcional ao tamanho da planta, em função da respiração de manutenção. Isso explica, em parte, a maior produtividade em variedades de porte reduzido (Pereira, 1989).

O componente agronômico, peso médio de 100 grãos é uma característica geneticamente determinada, porém, influenciada pelo ambiente. A disponibilidade hídrica afeta, de modo direto, o peso dos grãos de soja, aumentando ou diminuindo em função da sua ocorrência, principalmente no período de enchimento de grãos, onde o estresse hídrico provoca redução. A falta de água durante esse período reduz o tamanho e peso do grão devido à diminuição do suprimento de fotoassimilados produzidos pela planta e/ou inibição do metabolismo próprio grão (Rocha, 2009).

Marinho (2014) trabalhando com caracterização molecular e fisiológicas de linhagens de soja, observou que, na cultivar que apresentou melhor desempenho fotossintético, houve também, redução na condutância estomática que resultou em menor concentração interna de CO₂, entretanto essa redução na gs não foi suficiente para promover alterações na A. Essa mesma cultivar, obteve melhor desempenho nos componentes produtivos (número total de vagens por planta, número total de sementes e massa seca de sementes).

Yokoyama et al. (2018), avaliando a relação entre o índice SPAD e a produtividade de grãos em plantas de soja, observaram que no período vegetativo não houve correlação entre estas variáveis. Contudo, na fase de enchimento de grãos foi encontrada correlação positiva entre o índice SPAD e a produtividade. Segundo os autores, esse resultado é em decorrência da alta demanda por fotoassimilados nesse período para a formação dos grãos.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J. D. N. **Partição do fluxo de CO₂ e eficiência do uso de água em pastagem natural**. 2017. 58f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Aplicada) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.
- ARRUDA, I. M. et al. Crescimento e produtividade de cultivares e linhagens de amendoim submetidas a déficit hídrico. **Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, v. 45, n. 2, p. 146-154, abr/jun. 2015.
- AZEVEDO NETO, A. D. de. et al. Fluorescência da clorofila como uma ferramenta possível para seleção de tolerância à salinidade em girassol. **Rev. Ciênc. Agron.**, Fortaleza, v. 42, n. 4, p. 893-897, out/dez., 2011.
- BACELAR, E. L. V. A. et al. Water use strategies of plants under drought conditions. In: AROCA, R. (Ed). **Plant response to drought stress**, Heidelberg: Springer-Verlag, p. 145-195, 2012.
- BAKER, N. R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. **Annu. Rev. Plant Biol.**, v. 59, p. 89-113, 2008.
- BAKER, N. R.; ROSENQVIST, E. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 403, p. 1607-1621, ago., 2004.
- BEZERRA, M. A. **Trocas gasosas, fluorescência e níveis de carboidratos em cultivares de soja submetidos a défices hídrico e de fósforo**. 2000. 100f. Tese (Doutorado em Fisiologia Vegetal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.
- BJÖRKMAN O.; DEMMIG B. Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. **Planta**, v. 170, p. 489-504, 1987
- BONATO, E. R. **A soja no Brasil: história e estatística**. Londrina: Embrapa - CNPSo, 1987. 61p.
- BONATO, E. R. **Estresse em soja**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 254 p. 2000.
- BOUCHENAK, F. Differential responses to salinity of two *Atriplex halimus* populations in relation to organic solutes and antioxidant systems involving thiol reductases. **Journal of Plant Physiology**, v. 119, n.15, p. 1445-1453, out., 2012.
- CÂMARA, G.M.S. Ecofisiologia da soja e rendimento. In: CÂMARA, G. M.S. (Ed.) Soja: tecnologia da produção. Piracicaba, 1998, p. 256-277.
- CAMPOSTRINI, E. **Fluorescência da clorofila a: considerações teóricas e aplicações práticas**. Universidade Estadual do Norte Fluminense. Apostila, 2001.

CHAVARRIA, G. et al. Restrição fotossintética de plantas de soja sob variação de disponibilidade hídrica. **Ciência Rural**, v. 45, n. 8, p. 1387-1393, ago., 2015.

COMAS, L. H. et al. Water productivity under strategic growth stage-based deficit irrigation in maize. **Agricultural water management**, Fort Collins, v. 212, p. 433-440, 2019.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: terceiro levantamento**. Monitoramento agrícola – Safra 2018/19, Brasília, v. 6, n. 3, dez. 2018.

CONCEIÇÃO, O. A. C. **A expansão da soja no Rio Grande do Sul – 1950-75**. Porto Alegre, FEE, n. 6, 1984. 108p.

COPETTI, M. Q. **Área foliar da soja em relação ao uso de bioestimulantes**. 2014. 37f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2014.

COSTA, F. da S. et al. Crescimento, produtividade e eficiência no uso da água em bananeira irrigada no semiárido paraibano. **Ver. Caatinga**, Mossoró, v. 25, n. 4, p. 26-33, out/dez., 2012.

COUTO, T. R. do et al. Eficiência fotossintética e crescimento de genótipos de abacaxizeiro cultivados in vitro em diferentes qualidades de luz, tipos de frasco de cultivo e concentrações de sacarose. **Rev. Bras. de Frutic.**, Jaboticabal, v. 36, n. 2, p. 459-466, jun., 2014.

DECICINO, T. **A importância do posicionamento de cultivares de soja para o sucesso da cultura**. Relatório Monsoy. 2015. 12p.

DEVACHT, S. et al. Influence of low temperatures on the growth and photosynthetic activity of industrial chicory, *Cichorium intybus* L. partim. **Photosynthetica**, v. 47, n. 3, p. 372, 2009.

EMBRAPA. **Sistema de produção 11: Tecnologias de produção de soja – região central do Brasil 2007**. Londrina: EMBRAPA SOJA, 2006, 225p.

ESMAEILPOUR, A. et al. Osmotic stress affects physiological responses and growth characteristics of three pistachio cultivars. **Acta Physiol Plant**, v. 37, n. 6, p. 123, 2015.

FIRMINO, R. S.; KUWAHARA, F. A.; SOUZA, G. M. Relação entre adubação fosfatada e deficiência hídrica em soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 7, p. 1967-1973, out., 2009.

FLOOD, P. J. et al. Phenomics for photosynthesis, growth and reflectance in *Arabidopsis thaliana* reveals circadian and long-term fluctuations in heritability. **Plant Methods**, v. 12, n. 1, p. 1-14, 2016.

GAVA, R. et al. Estresse hídrico em diferentes fases da cultura da soja. **Rev. Bras. de Agric. Irr.**, Fortaleza, v. 9, p. 349-359, nov./dez., 2015.

GAVA, R. et al. Water depths for different soybean cultivars in center pivot. **R. Bras. de Eng. Agríc. e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 1, p. 10-15, 2018.

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 soybean genotypes before and during mild drought. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 8, p. 2875-2887, 2011.

GUIMARÃES, F. D. S. et al. Cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill.] para cultivo de verão na região de Lavras-MG. **Ciênc. e agrotec.**, Lavras, v. 32, p. 1099-1106, jul./ago., 2008.

GUTIERREZ-GONZALEZ, J.J. et al. Differential expression of isoflavone biosynthetic genes in soybean during water deficits. **Plant Cell Physiology**, v. 51, p. 936-948, 2010.

HARTMAN, G. L.; WEST, E. D.; HERMAN, T. K. Crops that feed the World 2. Soybean - Worldwide production, use, and constraints caused by pathogens and pests. **Food Security**, v. 3, n. 1, p. 5-17, mar. 2011.

HURRY, V. M. et al. Effect of long-term photoinhibition on growth and photosynthesis of cold-hardened spring and winter wheat. **Planta**, v. 188, n. 3, p. 369-375, 1992.

JESUS, E. G. de. et al. Growth and gas exchanges of arugula plants under silicone fertilization and water restriction. **Rev. Bras. de Eng. Agríc. e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 2, p. 119-124, 2018.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2008. 431 p.

KNAUER, J. et al. The response of ecosystem water-use efficiency to rising atmospheric CO₂ concentrations: sensitivity and large-scale biogeochemical implications. **New Phytologist**, v. 213, n. 4, p. 1654-1666, set., 2016.

KNAUER, J. et al. Towards physiologically meaningful water-use efficiency estimates from eddy covariance data. **Glob. Change Biol.**, v. 21, n. 2, p. 694-710, 2018.

KREUTZ, M. R. et al. O cultivo da soja e a supressão da vegetação durante a década de 1970: um estudo sobre minifúndios do Vale do Taquari, Rio Grande do Sul. **Desenvolvimento em Questão**, Ijuí, v. 12, n. 26, p. 320-346, abr/jun., 2014.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. São Carlos: RiMa. 2004. 531p.

LINS, L. K. **Variação de traços funcionais que estruturam comunidades vegetais em restingas**. 2017. 55 f. Dissertação (Mestrado em Diversidade Biológica e Conservação nos Trópicos) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.

LLOYD, J. et al. A simple calibrated model of Amazon rainforest productivity based on leaf biochemical properties. **Plant, Cell and Environment**, v. 18, p.1129-1145, 1995.

LOPES, E. C. **Condutividade hidráulica, eficiência fotoquímica e trocas gasosas em genótipos de soja (*Glycine max* L.) com diferentes capacidades de nodulação**. 2017. 92f. Dissertação (Mestrado Produção Vegetal). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2017.

LUO, Z. et al. Effects of reduced nitrogen rate on cotton yield and nitrogen use efficiency as mediated by application mode or plant density. **Field Crops Research**, v. 218, p. 150-157, 2018.

MANTOVANI, E. E. **Caracterização agrônômica de progênies de soja contendo alelos para tolerância a herbicidas das sulfoniluréias**. 2017. 92f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de Brasília, Brasília. 2017.

MARINHO, J. P. **Caracterização de respostas moleculares e fisiológicas de plantas de soja geneticamente modificadas super expressando o fato AtAREB1 sob déficit hídrico**. 2014. 94f. Dissertação (Mestrado em Genética e Biologia Molecular) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2014.

MARENCO, R. A. et al. Fisiologia de espécies florestais da Amazônia: fotossíntese, respiração e relações hídricas. **Ceres**, v. 61, n. 7, 2015.

MARENCO, R. A.; LOPES, N. F. **Fisiologia vegetal: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral**. 3ªed. Editora UFV, Viçosa. 486p. 2009.

MASTRODOMENICO, A. T.; HENDRIX, C. C.; BELOW, F. E. Nitrogen Use Efficiency and the Genetic Variation of Maize Expired Plant Variety Protection Germplasm. **Agriculture**, v. 8, n. 1, p. 1-17, 2018.

MEDEIROS, S. L. P.; WESTPHALEN, S. L.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Relações entre evapotranspiração e rendimento de grãos de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, jan. 1991, v. 26, n. 1, p. 1-10.

MELO, H. F. de.; SOUZA, E. R. de.; CUNHA, J. C. Fluorescence of chlorophyll a and photosynthetic pigments in *Atriplex nummularia* under abiotic stresses. **Rev. Bras. de Eng. Agríc. e Ambiental**, Campina Grande, v.21, n.4, p.232-237, mar., 2017.

MOLL, R. H. et al. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. **Agronomy Journal**, v. 74, n. 3, p. 562-564, 1982.

MORAIS, R. de.; ROSSI, L. M. B.; HIGA, R. C. V. Trocas gasosas de plantas jovens de taxi-branco submetidas à variação de temperatura foliar e suspensão da irrigação. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 97-104, jan/mar., 2017.

MORGAN, P.B. et al. Season-long elevation of ozone concentration to projected 2050 levels under fully open-air conditions substantially decreases the growth and production of soybean. **New Phytologist**, v. 170, n. 2, p. 333–343, 2006.

MURGA-ORRILLO, H. et al. Influência da cobertura morta na evapotranspiração, coeficiente de cultivo e eficiência de uso de água do milho cultivado em cerrado. **Irriga**, v. 21, n. 2, p. 352, 2018.

NANKISHORE, A.; FARRELL, A. D. The response of contrasting tomato genotypes to combined heat and drought stress. **Journal of plant physiology**, v. 202, p. 75-82, 2016.

NASCIMENTO, Sebastião P. do et al. Tolerância ao déficit hídrico em genótipos de feijão-caupi. **R. Bras. de Eng. Agríc. Ambiental**, v. 15, n. 8, p. 853-860, 2011.

NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. **Estádios fenológicos da soja**. 2000. Disponível em: <bioinfo.cnpso.embrapa.br/seca/index.php/.../estádios-fenologicos>. Acesso em: 27 jun. 2017.

PAIXÃO, J. S. **Assimilação fotossintética do carbono, respiração Foliar e crescimento de dois genótipos de mamoeiro (*Carica papaya* L.) contrastantes para o teor de clorofila no limbo da folha**. 2018. 102f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campo dos Goytacazes. 2018.

PEREIRA, A. R. Aspectos fisiológicos da produtividade vegetal. **Rev. Bras. Fisiol. Vegetal**, v. 1, n. 2, p. 139-42, 1989.

PROCÓPIO, S. O. et al. Absorção e utilização do nitrogênio pelas culturas da soja e do feijão e por plantas daninhas. **Planta Daninha**, v. 22, n. 3, p. 365-374, 2004.

QADERI, M. M.; KUREPIN, L. V.; REID, D. M. Effects of temperature and watering regime on growth, gas exchange and abscisic acid content of canola (*Brassica napus*) seedlings. **Environmental and experimental botany**, v. 75, p. 107-113, 2012.

RAMOS, H. M. M. et al. Estratégias ótimas de irrigação do feijão-caupi para produção de grãos verdes. **Pesq. agrop. bras.**, Brasília, v. 47, n. 4, p. 576-583, abr. 2012.

RANJITHA, K. M. et al. Combining Ability of Six Wheat Genotypes and their F1 Diallel Crosses for Nitrogen Use Efficiency (NUE) and Related Traits Under 50 Per Cent Nitrogen Condition. **Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci**, v. 7, n. 1, p. 1237-1243, 2018.

RÊGO, G. M.; POSSAMAI, E. **Avaliação de teores de clorofila no crescimento de mudas do jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*)**. Embrapa Florestas-Comunicado Técnico (INFOTECA-E), 2004.

ROCHA, R. S. **Avaliação de variedades e linhagens de soja em condições de baixa latitude**. 2009. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Piauí, Teresina. 2009.

RODRIGUES, O. et al. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. **Pesq. agrop. bras.**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 431-437, mar., 2001.

ROSA, D. B. C. J et al. Gas exchange and antioxidant activity in seedlings of *Copaifera langsdorffii* Desf. under different water conditions. **An Acad Bras Cienc**, v. 89, n. 4, p. 3039-3050, 2017.

SALLA, L.; RODRIGUES, J. C.; MARENCO, R. A. Teores de clorofila em árvores tropicais determinados com o SPAD-502. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, n. S2, p. pg. 159-161, 2007.

SANTOS, C. M. et al. Atividade fotossintética em alface (*Lactuca sativa* L.) submetidas a diferentes compostagens de resíduos agroindustriais. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, v.3, p.95-102, 2010.

SANTOS, C. M. et al. Photosynthetic capacity and water use efficiency in *Ricinus communis* (L.) under drought stress in semi-humid and semi-arid areas. **An Acad Bras Cienc**, v. 89, n. 4, p. 3015-3029, 2017.

SAPETA, H. et al. Drought stress response in *Jatropha curcas*: growth and physiology. **Environmental and Experimental Botany**, v. 85, p. 76-84, 2013.

SCHAFFERT, R. E. et al. Phenotyping sorghum for adaptation to drought. In: MONNEVEUX, P.; RIBAUT, J. M. (Ed). **Drought phenotyping in crop: from theory to practice**, México, v. 2, p. 287-299, 2011.

SEDIYAMA, T. (Org.). **Tecnologias de produção e usos da soja**. 1. ed. Londrina, PR: Mecenas, 2009, v. 1. 314p.

SHU, S. et al. Effects of exogenous spermine on chlorophyll fluorescence, antioxidant system and ultrastructure of chloroplasts in *Cucumis sativus* L. under salt stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 63, p. 209-216, jan., 2013.

SILVA, A. R. A. da et al. Trocas gasosas em plantas de girassol submetidas à deficiência hídrica em diferentes estádios fenológicos. **Rev. Ciênc. Agron.**, v. 44, n. 1, p. 86-93, jan./mar.2013.

SILVA, R. B. C. et al. Eficiência de uso da água e da radiação em um ecossistema de manguezal no estado do Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3a, p. 104-116, 2006.

SILVA, W. D. et al. Índice de consumo e eficiência do uso da água em eucalipto, submetido a diferentes teores de água em convivência com braquiária. **Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 3, p. 325-335, set/dez. 2004.

SOUZA, D. S. **Compostos indólicos como atenuadores de danos do déficit hídrico em plantas de soja**. 2017. 36f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Viçosa, Rio Paranaíba, 2017.

SOUZA, P. J. de O. P. et al. Cowpea leaf area, biomass production and productivity under different water regimes in Castanhal, Pará, Brazil. **Rev. Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 3, p. 748-759, jul./set., 2017.

STRASSER, R.J.; TSIMILLI-MICHAEL, M.; SRIVASTAVA, A. **The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples**. In: Yunus, M., Pather, U., Mohanly P. (eds.). *Probing Photosynthesis: Mechanisms, Regulation and Adaptation*. Taylor and Francis, London, p. 445-483, 2000.

STRAUSS, A. J.; KRUGER, G. H.; STRASSER, R. J.; VAN HEERDEN, P. D. The role of low soil temperature in the inhibition of growth and PSII function during dark chilling in soybean genotypes of contrasting tolerance. **Physiologia Plantarum**, v. 131, p. 89-105, 2007.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3 ed. Piracicaba, Artmed. 720p., 2004.

TAN, M.; ZHENG, L. Increase in economic efficiency of water use caused by crop structure adjustment in arid areas. **Journal of environmental management**, v. 230, p. 386-391, 2019.

TEIXEIRA, G. C. da S. Early sowing can improve irrigation water use efficiency and yield of common bean. **Pesq. Agrop. Trop**, Goiânia, v. 47, n. 1, p. 118-126, jan/mar. 2017.

THOMAS, A. L. Soja: tipos de crescimento da planta. UFRGS, Porto Alegre. 2018. 59p.

THOMAS, A. L.; COSTA, J. A. **Soja: manejo para alta produtividade de grãos**. Porto Alegre: Evangraf, 2010. 248 p.

TODESCHINI, M. H. et al. Eficiência de uso do nitrogênio em cultivares modernas de trigo. **Bragantia**, v. 75, n. 3, 2016.

TURNER, N. C.; RAO, K. P. C. Simulation analysis of factors affecting sorghum yield at selected sites in eastern and southern Africa, with emphasis on increasing temperatures. **Agricultural Systems**, v. 121, p. 53-62, jul. 2013.

USDA, United States Department of Agriculture. **Oilseeds: World Markets and Trade**. Foreign Agricultural Service, Office of Global Analysis, dez., 2018. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/oilseeds.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2019.

WARREN, C.R. Soil water deficits decrease the internal conductance to CO₂ transfer but atmospheric water deficits do not. **Journal Experimental Botany**, v. 59, p.327-334, 2008.

WUEBKER, E.F.; MULLEN, R.E.; KOEHLER, K. Flooding and temperature effects on soybean germination. **Crop Science**, v. 41, p. 1857-186, 2001.

YOKOYAMA, A. H. et al. Índice de área foliar e SPAD durante o ciclo da soja em função da densidade de plantas e sua relação com a produtividade de grãos. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, n. 4, p. 531-538, 2018.

ZHU, X. et al. Seasonal dynamics of water use efficiency of typical forest and grassland ecosystems in China. **Journal of Forest Research**, v. 19, n. 1, p.70-76, jan., 2014.

CAPÍTULO 2 – ECOFISIOLOGIA E EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA DE CULTIVARES DE SOJA EM CONDIÇÕES DE CAMPO

RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar os parâmetros ecofisiológicos e a produtividade de cultivares de soja em condições de campo. O experimento foi realizado em uma fazenda comercial localizada no município de Açailândia, MA. Foram utilizadas três cultivares comerciais (CS01, CS02 e CS03), avaliadas durante os estádios V5 e R5. Sendo avaliados os parâmetros fisiológicos: assimilação fotossintética de CO₂, transpiração, condutância estomática, índice SPAD, Fv/Fm e índice fotossintético (PI). Com os valores das trocas gasosas, foram determinadas a eficiência instantânea do uso da água (EUA) e a eficiência intrínseca do uso da água (EIUA). Além disso, foram obtidas as biomassas e componentes de produção. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, com três cultivares e seis repetições. As trocas gasosas foram significativas no estádio R5, com a CS03 diferindo das demais. A CS02 apresentou as maiores médias da relação Fv/Fm e PI. A EUA apresentou equações lineares positivas para todas as cultivares. Em ambos os estádios de desenvolvimento, a CS02 foi mais eficiente no uso da água, tendo obtido maior valor de assimilação de CO₂ por cada grama de água transpirada no estádio V5 (13,62 mg CO₂ g⁻¹ H₂O). Os valores máximos de EIUA foram verificados na CS03, apresentando, 22,71 e 1,63 μmol CO₂ mol⁻¹ H₂O, para V5 e R5, respectivamente. De acordo com os resultados obtidos, a CS02 obteve os melhores desempenhos nas principais variáveis analisadas, apesar de ter mostrado baixos valores nas avaliações iniciais, expressou todo seu potencial genético no estádio produtivo, otimizando a utilização dos recursos disponíveis, resultando em uma maior produtividade para as condições de campo na região sudoeste do Maranhão.

Palavras-chave: trocas gasosas, *Glycine max*, fluorescência da clorofila.

INTRODUÇÃO

A soja se tornou uma importante *commodity* agrícola devido à sua versatilidade de aplicação de seus produtos para consumo humano e animal, e ao seu valor econômico nos mercados nacionais e internacionais (Lima et al. 2017). A projeção da Conab (2018) para a safra 2018/19 é de 120,1 milhões de toneladas de grãos, 1,8% de crescimento da área de plantio e 0,7% de produção. A área no estado do Maranhão vai atingir nesta safra, 970,5 mil de hectares, incremento de quase 2% comparada a safra 2017/18.

Dada a importância da cultura da soja no contexto mundial, muitas cultivares estão disponíveis no mercado, e a escolha daquelas que melhor se adaptam a uma determinada região leva em consideração suas condições edafoclimáticas, que são preponderantes para um bom rendimento (Gava et al. 2018). Com isso, o entendimento dos mecanismos que alteram os processos fisiológicos das plantas, é essencial para a otimização do manejo das culturas agrícolas. Sendo a escolha da cultivar um fator crucial para o sucesso da lavoura, logo, a necessidade de conhecer o comportamento das cultivares nas diversas regiões é determinante.

A crescente frequência e intensidade de períodos de seca, associados a altas temperaturas, é esperado no futuro próximo, em virtude das mudanças climáticas, causando perdas substanciais em áreas agrícolas. Por consequência, torna-se necessário desenvolver estratégias de adaptação capazes de mitigar os impactos negativos sobre a oferta de alimentos (Arruda et al. 2015). A adaptação de espécies aos efeitos das mudanças no clima pode ajudar no manejo da água em condições de diferente umidade, razão pela qual o uso da água reflete a complexidade de fatores envolvidos na interação planta-ambiente (Silva et al. 2004).

Desse modo, avaliações do desempenho ecofisiológico das plantas permite entender o comportamento dos parâmetros fisiológicas (condutância estomática, transpiração, fotossíntese e temperatura foliar), bem como as respostas no rendimento produtivo, sendo de importância fundamental para o desenvolvimento de novos sistemas de manejo, no sentido de reduzir os riscos de perda de produção em função da climatologia local (Nascimento et al. 2011).

A eficiência do uso da água é uma propriedade importante dos vegetais, que caracteriza a ligação dos ciclos da água e carbono. Compreender os mecanismos fisiológicos envolvidos nessa propriedade, e ser capaz de prever seu comportamento em um ambiente de constantes mudanças é um desafio fundamental (Knauer et al. 2017). A dependência do rendimento da cultura em função do suprimento de água, é resultado das relações água-solo-planta-atmosfera. A planta precisa equilibrar dois fatores que ocorrem ao mesmo tempo: a

conservação de água e assimilação de CO₂ atmosférico. A defasagem entre os processos de transpiração, absorção e disponibilidade de água no solo, acabam provocando diminuição da produtividade, por inviabilizar o processo fotossintético (François, 2012).

O presente estudo teve como objetivo avaliar o comportamento ecofisiológico de plantas de soja cultivadas na região Oeste do estado do Maranhão. E observar como as condições ambientais interferiram no crescimento e desenvolvimento das cultivares, e determinar qual apresentou a melhor eficiência do uso da água e maior produtividade.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Fazenda Reunidas Bola Branca, localizada no município de Açailândia, região Oeste do estado do Maranhão (4°42'09" S e 47°37'00" W, altitude de 240 m). A região apresenta caracterização climática tropical subúmida (tipo Aw – segundo Köppen), com média pluviométrica anual de 1334 mm e temperaturas de 16°C a 40°C, com média de 26°C. As chuvas ficam mais distribuídas nos meses de novembro a maio, sendo março o mês mais chuvoso na região (296 mm), de junho a agosto o clima se torna mais seco com dias quentes e madrugadas relativamente amenas (Correia Filho, 2011). A análise química do solo, bem como as características físicas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Atributos químicos e físicos do solo da área experimental no município de Açailândia/MA.

Prof.	pH*	M.O.	P	S	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	V	M
		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	%	%				
0-20cm	5,0	2,9	13,5	14	0,25	3,8	0,9	0	2,5	6,95	64	0
								Argila			700	
								Silte	g kg ⁻¹		75	
								Areia			225	

*pH em CaCl₂

Foram utilizadas 3 cultivares comerciais de soja, CS01, CS02 e CS03, indicadas para os estados da Bahia, Maranhão, Tocantins e Piauí. A condução do experimento ocorreu no ano safra 2017/18 (plantio dez./17 e colheita abr./18) e o plantio foi por semeadura direta na palha.

As condições ambientais foram monitoradas com o auxílio de uma miniestação meteorológica (WatchDog, series 2000, modelo 2900ET, Spectrum Technologies, Inc., Illinois, USA) e os dados coletados (temperatura média, máxima e mínima, umidade relativa do ar, radiação fotossinteticamente ativa e precipitação pluviométrica) foram armazenados ao longo

do dia com intervalos de 60 min. O déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}), foi obtido segundo equação proposta por Jones (1992):

$$DPV_{ar} = 0,61137 \cdot e^{\left(\frac{17,502 \cdot (T_{ar})}{240,97 + T_{ar}}\right)} \cdot \left(1 - \frac{UR}{100}\right)$$

Em que: DPV: déficit de pressão de vapor; exp: exponencial; T: temperatura em graus Celsius; UR: umidade relativa em %.

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, com três cultivares e seis blocos. As parcelas foram constituídas por cinco linhas de 4,5 m de comprimento, com espaçamento de 0,50, com área útil de 10,5 m² (três linhas centrais com três metros e meio de comprimento). As análises biométricas foram determinadas em 30 plantas por parcela e começaram a partir dos 20 dias após o plantio (DAP), prosseguindo a cada 15 dias, até o final do ciclo. As medidas fisiológicas foram realizadas em três plantas por parcela, em duas campanhas durante o ciclo, a primeira no estágio vegetativo (V5) e a segunda no estágio reprodutivo (R5), que corresponde ao enchimento de grãos.

As análises biométricas: altura, realizada com auxílio de fita métrica graduada; diâmetro, realizada com paquímetro digital (Paquímetro digital em Aço, 150 mm, Stainless).

O Índice de qualidade de Dickson foi determinado a partir da metodologia de Dickson et al. (1960), considerando os indicadores de massa seca da parte aérea, das raízes e de massa seca total, altura e diâmetro do colo das mudas.

$$IQD = \frac{MST}{\left(\frac{A}{D}\right) + \left(\frac{MSPA}{MSR}\right)}$$

Onde: IQD: Índice de desenvolvimento de Dickson; MST: Massa da matéria seca total; A: Altura (cm); D: Diâmetro do colo (cm); MSPA: massa da matéria seca da parte aérea (g); MSR: massa da matéria seca da raiz.

A massa foliar específica (MFE) foi realizada com o auxílio de um perfurador de diâmetro conhecido (0,264 cm²). Foram coletados, ao final do ciclo da cultura (estádio R8), 10 discos de três plantas por parcelas. Depois os discos foram secos em estufa de circulação forçada de ar a 70°C por 72 horas, até peso constante. E a MFE calculada a partir da razão: peso dos discos (g) / área dos discos (0,264 cm²).

As medidas dos parâmetros fisiológicos ocorreram no horário de 07:30 às 10:00h da manhã. Foi utilizada para as medições uma folha totalmente expandida localizada no terço superior da planta. A assimilação fotossintética de CO₂ (A), transpiração (E) e condutância estomática (g_s) foram determinadas com o auxílio do analisador a gás por infravermelho portátil

(IRGA), modelo Li-6400 (LI-COR, Lincoln, NE, USA), utilizando uma fonte luminosa fixa em $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de intensidade de fluxo de fótons fotossintéticos.

O teor relativo de clorofila foi estimado com o auxílio de um Medidor Portátil de Clorofila (MPC), modelo SPAD-502 “*Soil Plant Analyser Development*” (Minolta, Japão). Por meio do fluorímetro não-modulado, modelo Pocket PEA (*Plant Efficiency Analyser*, Hansatech, King’s Lynn, UK), foi obtida a relação F_v/F_m (um único pulso forte de luz, 1s de $3500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, foi aplicado, após aclimatação por um período de 20 min) (Bòlhar-Nordenkampf et al. 1989). Com o auxílio do fluorímetro, também foi determinado o índice fotossintético “*Photosynthetic Index*” (PI).

A eficiência instantânea do uso da água (EUA) foi estimada por meio da equação linear ajustada no gráfico de dispersão, com os valores da assimilação fotossintética CO_2 e da transpiração (A/E). Assim como, a eficiência intrínseca no uso da água (EIUA), apenas substituindo-se os valores de E , pelos valores da condutância estomática (A/g_s) na dispersão. A eficiência agrônômica no uso da água (EAUA), foi obtida pelo quociente entre a produtividade da cultura e o volume total de água precipitado no período referente ao ciclo da cultura. Sendo $\text{EAUA} = Y/I$, em que: Y : produtividade da cultura em kg ha^{-1} ; I : volume de água precipitado, $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$.

Os componentes produtivos foram avaliados após o estágio R8, onde foram colhidas trinta plantas por parcela, para quantificação do número total de vagens (NTV) e o número total de grãos (NTG). O peso de mil grãos (PMG) foi obtido por meio da avaliação de 8 subamostras de 100 grãos cada, conforme Regras para Análise de Sementes (Brasil, 2009). A produtividade de grãos (kg ha^{-1}) foi determinada pela pesagem de todos os grãos das plantas colhidas em cada parcela (6 m^2 , com total de 36 m^2 por cultivar), sendo extrapolada para a área de 1 ha (10.000 m^2).

As biomassas, massa da matéria seca da parte aérea (MSPA) e massa da matéria seca de raízes (MSR), foram obtidas a partir de 30 plantas, secas em estufa de circulação forçada de ar a 70°C por 72 horas. Depois de pesadas foram determinadas a massa da matéria seca total (MST) e Relação MSR/MSPA.

Após a pesagem MSPA foi retirada amostras, e levadas ao Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas, da Universidade Estadual do Maranhão, *campus* São Luís, para quantificação do conteúdo de nitrogênio presente. Sendo, a eficiência no uso do nitrogênio determinada conforme Hakeem et al. (2011) adaptada: $\text{EUN} = \text{MSPA}/\text{CNPA}$, em que: MSPA: Massa da parte aérea seca (g); CNPA: Conteúdo de nitrogênio da parte aérea (g).

Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade, com auxílio do software IBM SPSS Statistics 23. As variáveis de EUA e EIUA foram analisadas por meio da dispersão dos pontos com o auxílio do Microsoft Excel 2007, que também foi utilizado na confecção dos gráficos e tabelas.

RESULTADOS

VARIÁVEIS CLIMÁTICAS

Durante o período experimental, a temperatura máxima foi de aproximadamente 33°C e a mínima de 20°C, com temperatura média de 25°C. A umidade relativa apresentou média de 84%. A precipitação acumulada registrada foi de 946,5 mm (23/12/2017 a 08/04/2018, plantio e colheita, respectivamente), com maior volume no mês de março (234,7 mm) (Figura 1A). O valor mais elevado de DPV_{ar} encontrado foi de 3,0 kPa (Figura 1B). A radiação fotossinteticamente ativa teve valores máximos de 1799 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em V5 e 1794 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em R5 (Figura 1C).

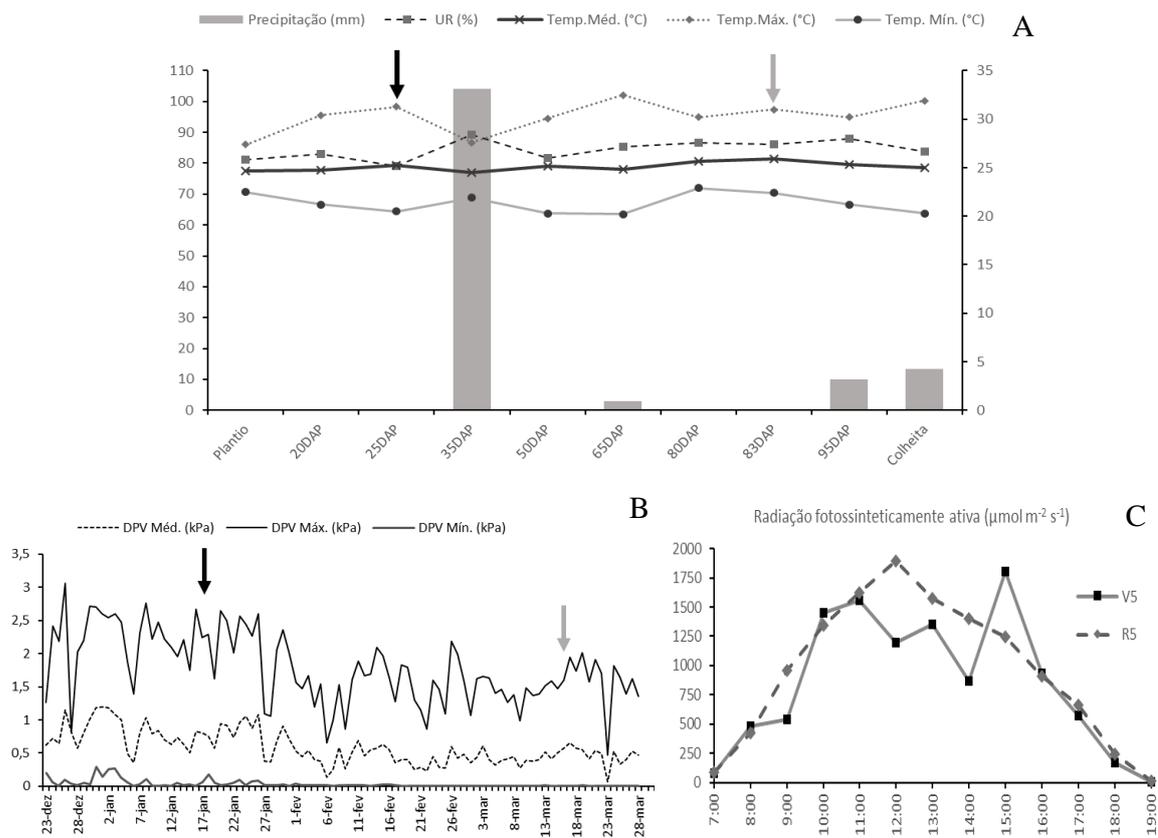


Figura 1 – Características climáticas: precipitação, umidade relativa - UR, e temperaturas (A); Déficit de pressão de vapor – DPV_{ar} (B) e Radiação fotossinteticamente ativa (C). Setas pretas: indicam primeira campanha fisiológica no estádio V5; Setas cinzas: indicam segunda campanha fisiológica no estádio R5.

VARIÁVEIS DE CRESCIMENTO

Houve diferença significativa ($p < 0.05$) entre as cultivares de soja estudadas para as variáveis: altura de plantas, diâmetro do colo, massa da matéria seca de raiz (MSR), relação MSR/MSPA, massa foliar específica (MFE) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD).

Com relação à altura de plantas, a CS01 destacou-se apresentando média de 78,3 cm (Figura 2A). A CS01 apresentou os maiores valores médios para o diâmetro do colo até os 35 dias após o plantio (DAP), a partir dos 50 DAP a CS02 obteve os maiores valores, chegando a 10,66 mm aos 95 DAP, 20% superior a CS03 que apresentou o menor valor entre as cultivares, 8,52 mm (Figura 2B).

Não houve diferença estatística ($p > 0.05$) para os valores de massa da matéria seca da parte aérea (MSPA) e total (MST). Sendo a média para MSPA entre as cultivares de 10,25 g planta⁻¹ (Figura 2C). E para MST, de 12,83, 13,38 e 11,92 g planta⁻¹ para CS01, CS02 e CS03,

respectivamente (Figura 2E). A CS02 obteve 2,92 g planta⁻¹ de acúmulo de MSR, 35% e 13 % a mais que as CS03 (1,90 g planta⁻¹) e CS01 (2,55 g planta⁻¹) (Figura 2D).

A CS03 apresentou a maior média para MFE (0,0046 g cm⁻²) e menor da relação MSR/MSPA (0,19 g g⁻¹) (Figura 2F e 2G). A menor média de IQD observada na Figura 2H, pode ser verificada na CS03. Em contraste, é possível observar que a CS02 se sobressaiu em relação as demais, com uma média significativamente superior de IQD.

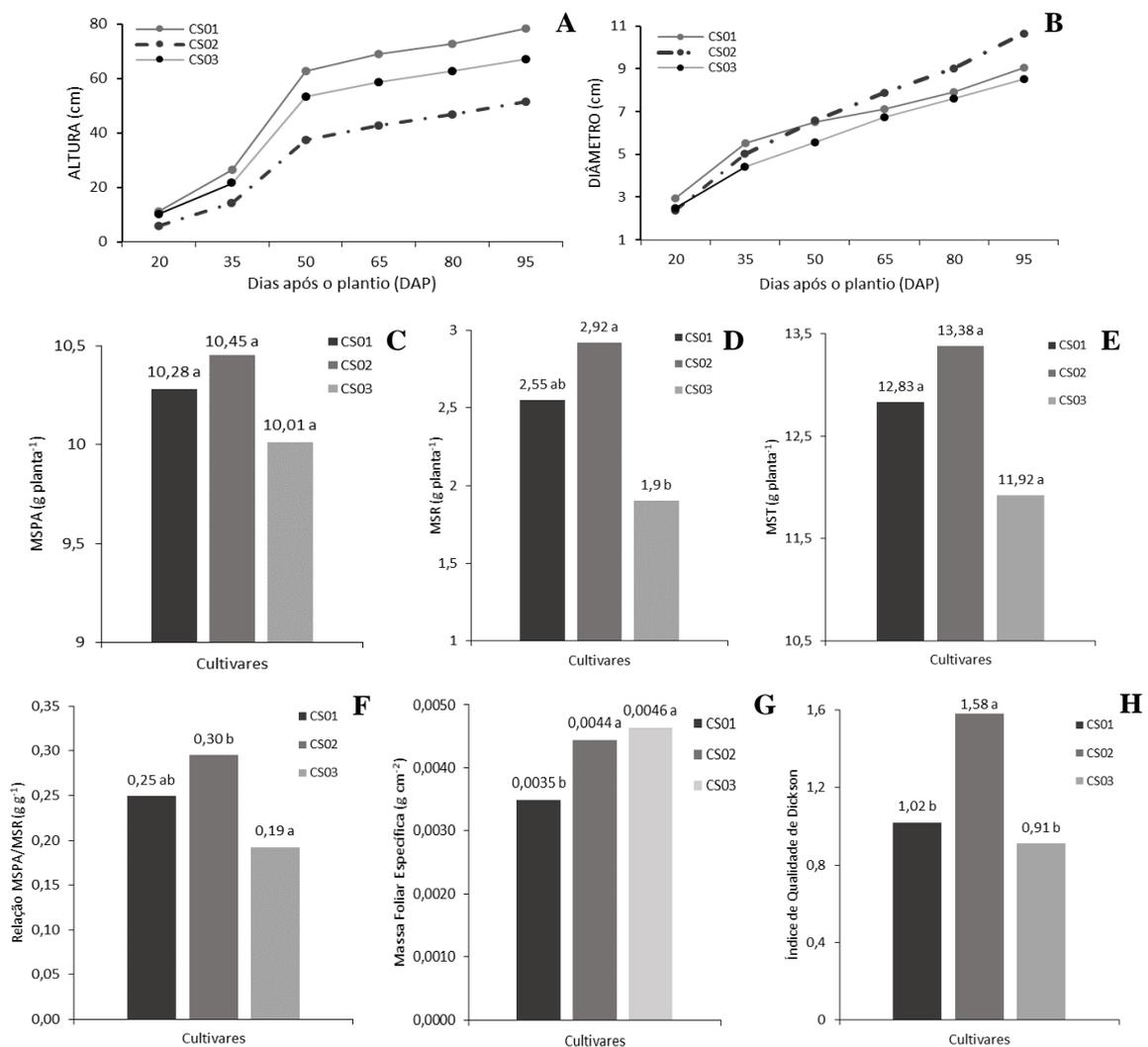


Figura 2 – Altura (A), diâmetro (B), massa da matéria seca da parte aérea - MSPA (C), massa da matéria seca de raiz – MSR (D), massa da matéria seca total – MST (E), Relação MSR/MSPA (F), Massa foliar específica (G) e Índice de qualidade de Dickson (H). Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Cada ponto representa a média de 30 plantas.

TROCAS GASOSAS

A assimilação fotossintética de CO_2 não apresentou diferença significativa ($p > 0.05$) no estágio de desenvolvimento V5, com média entre as cultivares de $14,6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Contudo, no estágio R5, houve diferença significativa ($p < 0.05$) e as cultivares apresentaram valores maiores quando comparadas ao estágio V5, destaque para a CS03 que atingiu $27,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 3A). A transpiração apresentou diferença significativa entre as cultivares nos dois estádios, V5 e R5 ($p < 0.05$). No estágio V5 a maior taxa transpiratória foi observada na CS01, com $10,68 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 3B). Em R5, a CS02 obteve o valor mais baixo de taxa transpiratória, $6,8 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Para condutância estomática apenas no período de enchimento de grãos (R5) houve diferença significativa ($p < 0.05$). A CS03 obteve a maior média, $0,78 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Enquanto a CS02 apresentou menor valor, $0,58 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, diferença de 25% com relação a CS03 (Figura 3C).

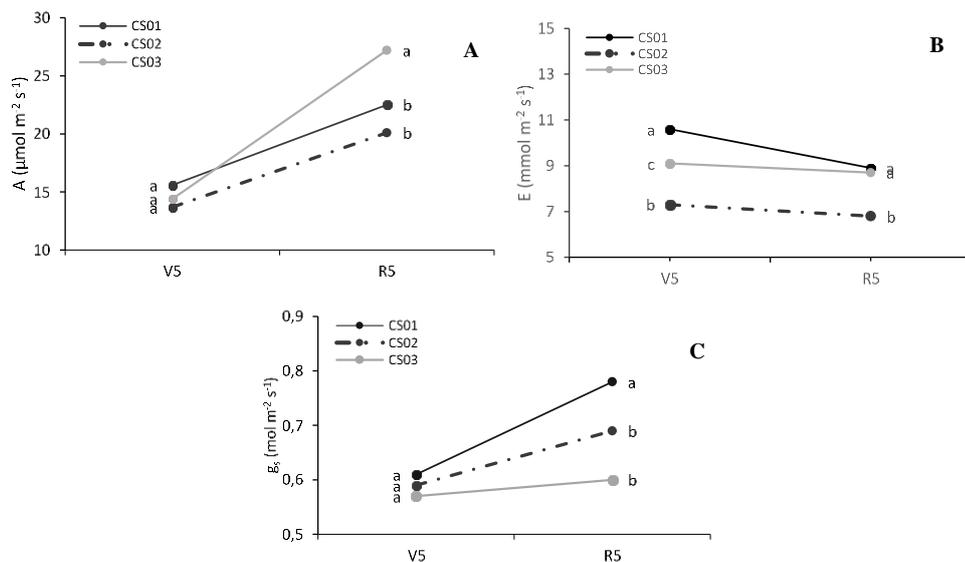


Figura 3 – Assimilação fotossintética de CO_2 – A (A), transpiração - E (B) e condutância estomática - g_s (C). V5: estágio vegetativo e R5: estágio reprodutivo – enchimento de grãos. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Cada ponto representa a média de 30 plantas.

EFICIÊNCIA FOTOQUÍMICA

O rendimento quântico máximo do fotossistema II, representado pela relação F_v/F_m , apresentou pouca variação entre as cultivares nos estádios de desenvolvimento

estudados. Sendo que, a CS02 obteve as maiores médias, 0,80 e 0,81 para V5 e R5, respectivamente (Figura 4A). Quanto ao índice fotossintético, que reflete o estado da atividade fotoquímica dos fotossistemas I e II, verificou-se um incremento da atividade fotoquímica no estágio R5, quando comparado ao V5. Com valores de 7,62, 1,42 e 0,89 nas CS02, CS03 e CS01, respectivamente no estágio R5 (Figura 4B). O índice SPAD, que representa uma estimativa do teor relativo de clorofila presente na folha, apresentou incremento crescente ao longo do ciclo das cultivares (Figura 4C).

EFICIÊNCIA NO USO DO NITROGÊNIO

Verificou-se diferença significativa ($p < 0,05$) para eficiência no uso do nitrogênio (EUN). A CS02 foi a mais eficiente, produzindo 38,96 gramas de matéria seca para cada grama de nitrogênio assimilado. As CS01 e CS03, obtiveram respectivamente 36,11 e 24,43 g MS g⁻¹ N (Figura 4D).

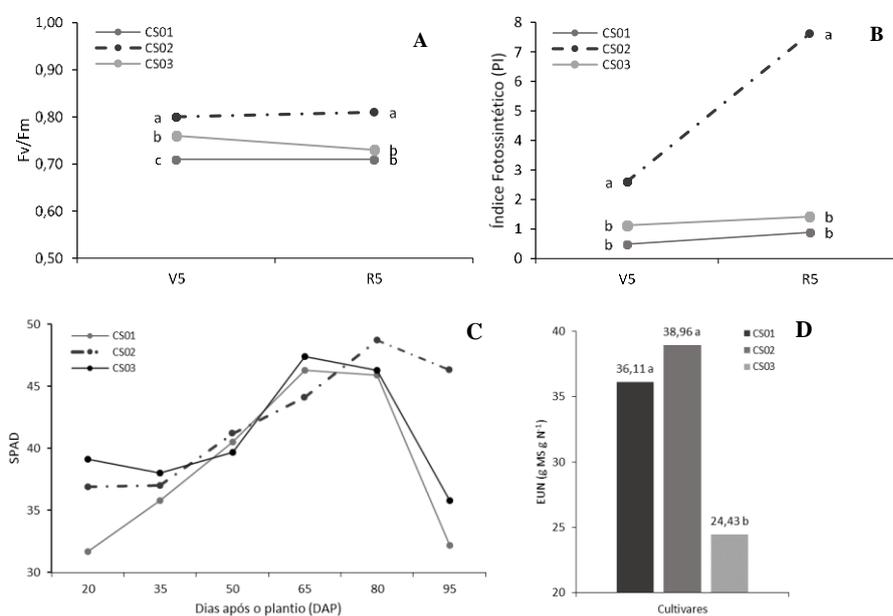


Figura 4 – Rendimento quântico máximo do fotossistema II (A), índice fotossintético (B), índice SPAD (C) e eficiência no uso de nitrogênio (D). V5: estágio vegetativo e R5: estágio reprodutivo – enchimento de grãos. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Cada ponto representa a média de 30 plantas.

EFICIÊNCIA NO USO DA ÁGUA

A eficiência no uso da água (EUA) apresentou relações lineares positivas, com melhor ajuste para CS02 no estádio R5 ($R^2=0,87$). Em ambos os estádios de desenvolvimento, a CS02 foi mais eficiente, com valores de 5,57 e 2,73 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$, para V5 e R5, respectivamente (Figura 5A e 5B). Tendo obtido maior valor de assimilação de CO_2 a cada grama de água transpirada no estádio V5 (13,62 $\text{mg CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$). Os valores máximos de eficiência intrínseca no uso da água (EIUA) foram verificados na CS03. Apresentando, 22,71 e 18,37 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$, para V5 e R5, respectivamente (Figura 5C e 5D).

A partir da EUA, obteve-se a razão de transpiração (1/inclinação da curva da EUA). Os menores valores de razão de transpiração foram encontrados na CS02 de 0,18 e 0,37 $\text{mmol de H}_2\text{O transpirada para cada mol de CO}_2 \text{ assimilado}$ (Figura 5E). A eficiência agronômica no uso da água (EAUA) representa a produtividade em peso por unidade de área, que a cultura consegue produzir a partir do volume de água precipitado durante o ciclo. Nesse estudo, a CS02 obteve melhor desempenho na EAUA, produzindo 0,39 kg de grãos por hectare para cada m^3 de água precipitado (Figura 5F). Atingindo rendimento 29 e 35% superior a CS01 e CS03, respectivamente.

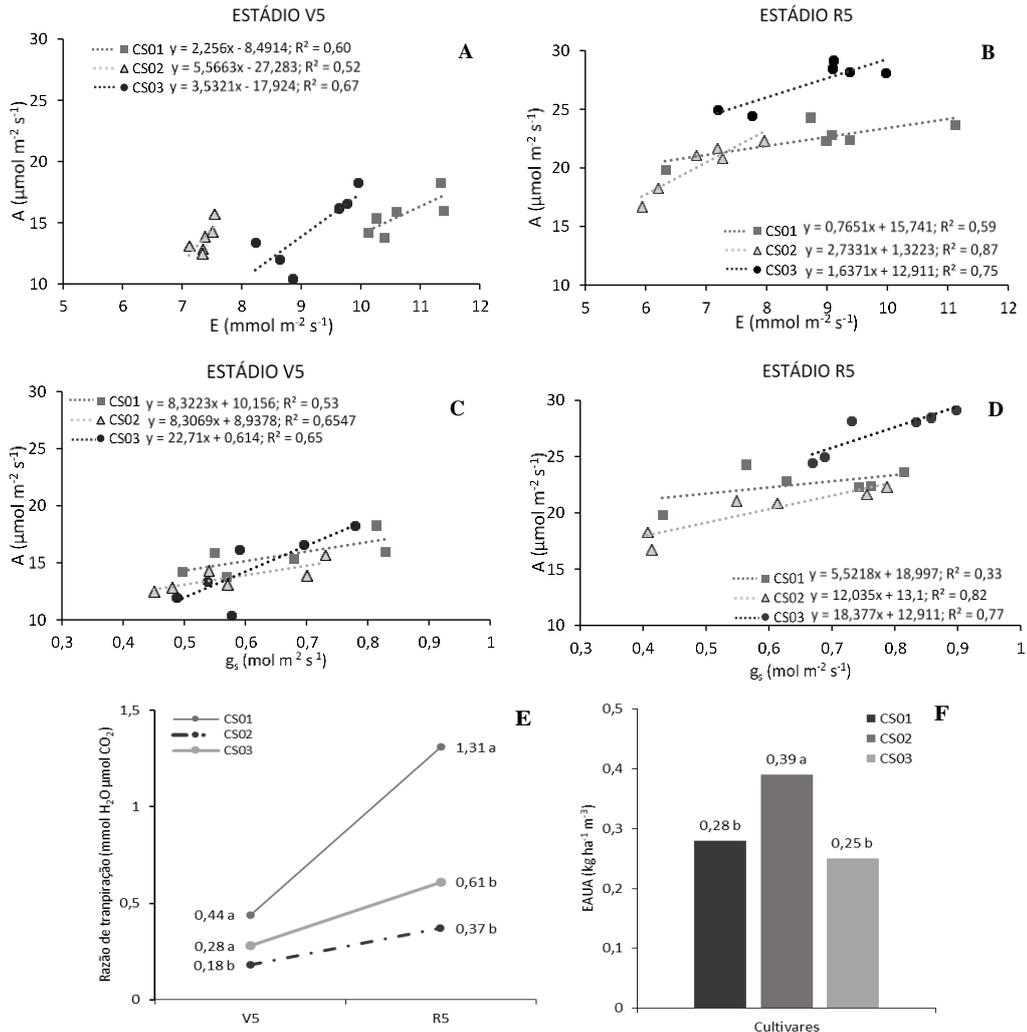


Figura 5 – Eficiência no uso da água – A/E (A e B), eficiência intrínseca no uso da água – A/g_s (C e D), razão de transpiração (E), e eficiência agrônômica no uso da água – EAUA (F). V5: estágio vegetativo e R5: estágio reprodutivo – enchimento de grãos. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

COMPONENTES DE PRODUÇÃO E PRODUTIVIDADE

Verificou-se diferença significativa para número total de vagens e grãos, com destaque para CS02 (Figura 6A e 6B). Essa cultivar apresentou valores de 69 vagens planta⁻¹ e 170 grãos planta⁻¹. Enquanto a CS01 obteve médias de 48 vagens planta⁻¹ e 101 grãos planta⁻¹, e a CS03 44 vagens planta⁻¹ e 105 grãos planta⁻¹. A CS03 apresentou a maior média para o peso de mil grãos (Figura 6C). Com relação a produtividade, a CS02 foi a mais produtiva, atingindo 3698 kg ha⁻¹. Sendo essa, 36% mais produtiva que a CS03, que teve menor produtividade. (Figura 6D).

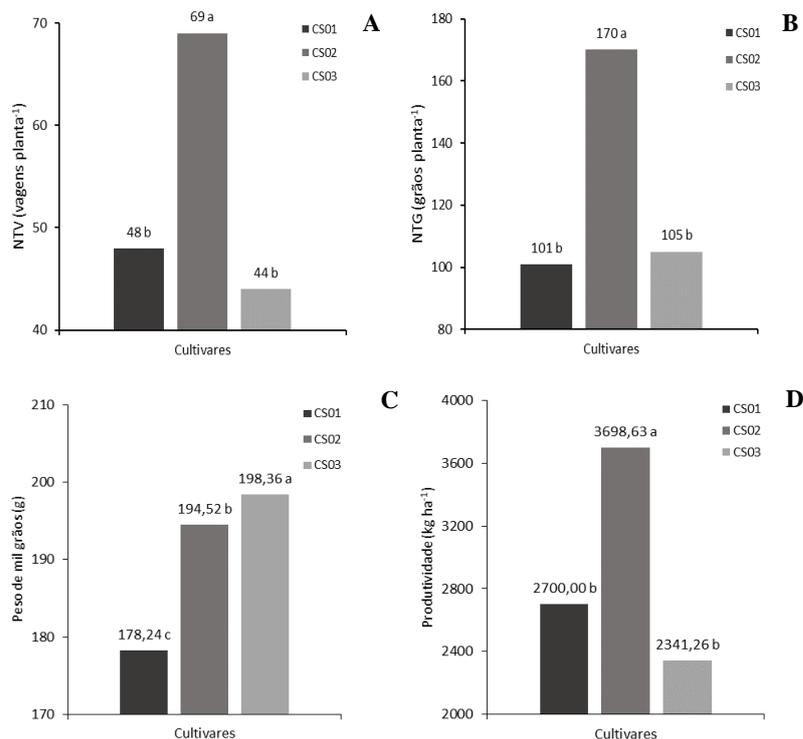


Figura 6 – Número total de vagens – NTV (A), número total de grãos – NTG (B), peso de mil grãos (C), e produtividade (D). Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

DISCUSSÃO

Todas as três cultivares de soja estudadas, apresentaram bons índices de crescimento em relação à altura e diâmetro, sendo estes crescentes ao decorrer do ciclo da cultura. O perfil genético das CS02 e CS03 descreve como altura média das plantas 72 e 76 cm, respectivamente (Monsoy, 2019). Contudo, nesse estudo, as mesmas apresentaram média de 51 e 67 cm (Figura 2A), redução superior a 10%. Esses resultados, podem ser decorrentes do tipo de crescimento dessas cultivares. Visto que, elas possuem tipo de crescimento determinado, com isso, quanto mais próximas a linha do Equador, essas plantas podem florescer mais cedo, reduzindo seu ciclo vegetativo e, conseqüentemente, a altura (Decicino, 2015; Thomas, 2018).

A CS02 obteve a maior média para o índice de qualidade de Dickson (IQD), 1,58 (Figura 2H). Apesar desta cultivar ter apresentado a menor estatura, ela alcançou os maiores valores de diâmetro, MSPA e MSR. Como o IQD avalia a distribuição de biomassa em plantas, e seu cálculo inclui os parâmetros morfológicos de altura, diâmetro e biomassas, a CS02, conseqüentemente, atingiu o maior índice por se destacar nesses aspectos (Medeiros et al. 2018)

A assimilação fotossintética de CO₂ (*A*) e a condutância estomática (*g_s*) no estágio V5 apresentaram valores mais baixos quando comparados ao R5. Isso, pode ter ocorrido devido as avaliações em R5 estarem mais favoráveis. Com condição de maior intensidade luminosa e menor déficit de pressão de vapor, aliada a disponibilidade hídrica (Figura 01), pois houve precipitação intensa no dia anterior a avaliação, podendo ter contribuído para melhor desempenho da atividade fotossintética das cultivares. Resultados similares de *A* encontrados em R5, são descritos por Djanaguiraman et al. (2019), com valores entre 21,3 e 28,3 μmol m⁻² s⁻¹.

A planta em resposta a um período de restrição hídrica tende a reduzir a condutância estomática, como mecanismo limitante de perda de água, conseqüentemente, isso reduz a assimilação de CO₂ (Nankishore e Farrell, 2016). Fenta et al. (2012), estudando a imposição de 18 dias de déficit hídrico em três cultivares de soja, relatam que o nível de fotossíntese caiu no segundo dia após a imposição do déficit. Resultados que, corroboram com este trabalho, visto que, no dia das avaliações no estágio V5, estava há dois dias sem chover, o que pode ter comprometido *A* nessa avaliação.

Cardona-Ayala et al. (2014), estudando as respostas fisiológicas e bioquímicas em feijão-caupi sob déficit hídrico, constataram que com a redução do teor de umidade do solo houve decréscimos significativos da assimilação fotossintética de CO₂ (*A*), condutância estomática (*g_s*) e transpiração (*E*). Assim como, Firmino et al. (2009) observaram que houve redução significativa na fotossíntese líquida e aumento da transpiração em plantas de soja submetidas a situações de deficiência hídrica. Pois, com a disponibilidade de água limitada, menos ATP e NADPH são formados e, como consequência, menos CO₂ é fixado de modo que o fotossistema II (PSII) depende de água para geração de energia química, requerida para fixação de CO₂, demonstrando, então, que variações na disponibilidade hídrica geram menor eficiência do fotossistema II (Silva et al. 2015).

A relação *F_v/F_m* descreve a eficiência quântica máxima da atividade fotoquímica do PSII. Essa relação tem sido utilizada para determinar distúrbios no sistema fotossintético, uma vez que, sua redução indica um declínio na eficiência fotoquímica do PSII e dano no aparato fotossintético (Azevedo Neto et al. 2011). Neste trabalho, todas as cultivares mantiveram bom funcionamento do aparato fotossintético, mantendo-se dentro da faixa de 0,71 a 0,81. Segundo Bolhar-Nordenkamp et al. (1989), plantas com valores de *F_v/F_m* entre 0,7 e 0,85, apresentam aparato fotossintético intacto, e abaixo de 0,7 indica uma situação estressante, com conseqüente, redução do potencial fotossintético da planta. Lopes (2017) trabalhando com genótipos de soja obteve resultados similares, com valores entre 0,71 e 0,84.

Para avaliação da condição fotoquímica dos vegetais, além da relação F_v/F_m , se tem o índice fotossintético (PI), que é considerado mais completo, por integrar três componentes independentes, avaliando a atividade dos fotossistemas II e I. Strasser et al. (2000) descrevem que valores acima de 0,5 de PI, indicam alta eficiência da aparato fotossintético. Sendo assim, com exceção da CS01, no período V5, que teve índice de 0,49, as demais cultivares estudadas apresentaram atividade fotoquímica satisfatória. Com destaque para CS02, que atingiu os maiores valores em ambos os períodos (Figura 4A e 4B).

O índice SPAD tem sido utilizado para avaliar o desenvolvimento de soja em diversos trabalhos (Ferreira et al. 2018; Santos et al. 2018; Gonçalves et al. 2018). Yokoyama et al. (2018) observaram correlação positiva entre o índice SPAD e a produtividade de grãos (com valores de 41 e 4028 kg ha⁻¹, respectivamente) em cultivares de soja no estágio R5, segundo os autores, isso se deve a alta demanda por fotoassimilados nesse período para a formação dos grãos. A CS02 apresentou a maior média no estágio R5, como é possível observar na Figura 4C aos 80 DAP. Aos 95 DAS verificou-se uma queda nos valores do índice, isso ocorreu devido ao período senescente das plantas.

O melhoramento genético da soja trouxe diversos benefícios para a cultura, porém, como constataram Serra et al. (2010), o aumento considerável de aplicações de herbicida em um mesmo ciclo tem prejudicado a fixação biológica de nitrogênio, e conseqüentemente a disponibilidade desse nutriente para as plantas. Com isso, o estudo da eficiência de utilização dos nutrientes pelas plantas, se faz necessário devido ao intensivo manejo que existente nas lavouras. Procópio et al. (2004), avaliando a absorção e utilização de nitrogênio em plantas de sojas encontraram média de 37 g MS g⁻¹ N. Valores semelhantes foram verificados para CS02 neste trabalho (Figura 4D).

A partir das variáveis de trocas gasosas, obtêm-se a eficiência instantânea do uso da água (A/E) e eficiência intrínseca no uso da água (A/g_s), estas, expressam a eficiência com que as plantas utilizam água ao mesmo tempo em que realizam a assimilação do carbono. Purcell et al. (1997) verificaram que cultivares com maiores níveis de EUA seriam capazes de manter maior produção de biomassa, resultado observado neste trabalho, com a CS02, que apresentou maiores valores de MST. Rosa et al. (2017) observaram que altos valores de EUA, são característicos de plantas tolerantes a baixa disponibilidade de recursos hídricos, e servem como parâmetros indicativos da plasticidade fisiológica das plantas aos fatores abióticos.

De acordo com Berry et al. (2010), plantas com alto controle estomático são mais eficientes no uso intrínseco da água. Comportamento encontrado nesse estudo, onde a CS03 apresentou as menores taxas de condutância estomática, e foi a cultivar com melhor eficiência

intrínseca do uso da água. Resultado encontrado também por Santos et al. (2017), que relatam a correlação da redução na condutância estomática, com o incremento da EIUA, que segundo os autores, indica a absorção de carbono com menor perda de água, contribuindo para manutenção da fotossíntese.

Com destaque nas variáveis que mais contribuem nas características agronômicas, a CS02, conseqüentemente, apresentou o maior número de vagens e grãos por planta. Apesar da CS03 ter apresentado maior PMG, essa cultivar foi a menos produtiva. Segundo Araújo et al. (2016) o peso de mil grãos é uma variável importante na avaliação da qualidade de grãos, porém pode gerar grande variabilidade devido as condições de temperatura, luminosidade e umidade, durante a fase de maturação em campo.

A CS02 obteve os melhores resultados para as variáveis de crescimento, relação F_v/F_m , índice SPAD e EUN. Sendo a cultivar que apresentou o uso mais eficiente da água, com os melhores valores de EUA e EAUA, e menor razão de transpiração. Conseqüentemente, alcançou notoriedade nos componentes produtivos, exibindo a maior produção de vagens e grãos, e maior produtividade.

CONCLUSÕES

As cultivares de soja estudadas apresentaram comportamentos similares de assimilação de CO_2 , transpiração e condutância estomática, bem como satisfatória atividade fotoquímica. A CS02 obteve melhor desempenho nas variáveis de crescimento: diâmetro de caule, massa da matéria seca da parte aérea e raízes, índice de qualidade de Dickson e relação MSR/MSPA. Apresentando destaque também, na relação F_v/F_m , índice fotossintético, índice SPAD e eficiência no uso de nitrogênio. Sendo a mais eficiente no uso da água e que obteve melhor aproveitamento da água precipitada durante o ciclo, com os maiores valores para eficiência instantânea, intrínseca e agronômica do uso da água.

Nas avaliações dos componentes agronômicos a CS02 teve desempenho superior as demais cultivares para número total de vagens e grãos, e produtividade. Esta cultivar, apresentou melhores estratégias fisiológicas para as condições climáticas que estava exposta. Apesar de ter mostrado baixos valores nas avaliações iniciais, durante o período vegetativo, expressou todo seu potencial genético no estágio produtivo, otimizando a utilização dos recursos disponíveis, resultando em uma maior produtividade para as condições de campo na região sudoeste do Maranhão.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, E. L. et al. **Obtenção de peso de mil sementes em genótipos de de cacauero** (*Theobroma cacao* L.). I SICT do Incaper, 2016. Disponível em: <<https://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/item/2525/1/I-SICT-OUTROS-027.pdf>>. Acesso em: 10 jan.2019.
- ARRUDA, I. M. et al. Crescimento e produtividade de cultivares e linhagens de amendoim submetidas a déficit hídrico. **Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, GO, v. 45, n. 2, p. 146-154, abr/jun. 2015.
- AZEVEDO NETO, A. D. de. et al. Fluorescência da clorofila como uma ferramenta possível para seleção de tolerância à salinidade em girassol. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 4, p. 893-897, out/dez., 2011.
- BERRY, J. A.; BEERLING, D. J.; FRANKS; P. J. Stomata: key players in the earth system, past and present. **Curr Opin Plant Biol**, v.13, p. 232-239, 2010.
- BOLHAR-NORDENKAMPF, H. R. et al. Chlorophyll fluorescence as a probe of the photosynthetic competence of leaves in the field: a review of current instrumentation. **Functional Ecology**, p. 497-514, 1989.
- BRASIL, Ministério Da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. 2009.
- CARDONA-AYALA, C. et al. Respuestas fisiológicas y bioquímicas del frijol caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp.) bajo déficit hídrico. **Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas**, v. 8, n. 2, p 250-261, jun./dez., 2014.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: terceiro levantamento**. Monitoramento agrícola – Safra 2018/19, Brasília, v. 6, n. 3, dez. 2018.
- CORREIA FILHO, F. L (Cord.). **Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea, estado do Maranhão**: relatório diagnóstico do município de Açailândia. CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Ministério de Minas e Energia. Teresina, 2011. 37f.
- DECICINO, T. **A importância do posicionamento de cultivares de soja para o sucesso da cultura**. Relatório Monsoy. 2015. 12p.
- DJANAGUIRAMAN, M. et al. Reproductive success of soybean (*Glycine max* L. Merrill) cultivars and exotic lines under high daytime temperature. **Plant, cell & environment**, v. 42, n. 1, p. 321-336, 2019.
- FENTA, B. A. et al. Characterization of drought-tolerance traits in nodulated soya beans: the importance of maintaining photosynthesis and shoot biomass under drought-induced limitations on nitrogen metabolism. **J. of Agronomy & Crop Science**, v. 198, n. 2, p. 92-103, 2012.

FERREIRA, A. S. et al. Soybean agronomic performance in response to seeding rate and phosphate and potassium fertilization. **Rev. Bras. de Eng. Agríc. e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 151-157, 2018.

FIRMINO, R. S.; KUWAHARA, F. A.; SOUZA, G. M. Relação entre adubação fosfatada e deficiência hídrica em soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 7, p. 1967-1973, out., 2009.

FRANÇOIS, T. **Relações hídricas e trocas gasosas em plantas de feijão submetidas à irrigação deficitária**. 2012. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

GAVA, R. et al. Water depths for different soybean cultivares in center pivot. **Rev. Bras. de Eng. Agríc. e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 1, p. 10-15, 2018.

GONÇALVES, F. A. R. et al. Atividade residual de herbicidas nas culturas do milho e da soja. **Rev. Cienc. Agrar.**, v. 61, 2018.

HAKEEM, K. R. et al. Nitrogen-efficient rice cultivars can reduce nitrate pollution. **Environ Sci Pollut Res**, v. 18, n. 7, p. 1184-1193, 2011.

IBM SPSS Statistics 23. Software. Disponível em: <<https://www.ibm.com/br-pt/products?loc=br-pt>>. Acesso em: 15 set. 2018.

JONES, H. G. **Plants and Microclimate: A quantitative approach to environmental plant physiology**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. p. 1-8.

KNAUER, J. et al. Towards physiologically meaningful water-use efficiency estimates from eddy covariance data. **Glob. Change Biol.**, v. 21, n. 2, p. 694-710, feb. 2017.

LIMA, M. D. D. et al. Potassium fertilization and sowing seasons on protein yield in soybean cultivares. **Rev. Bras. de Eng. Agríc. e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, n. 6, p. 392-397, mai. 2017.

LOPES, E. C. **Condutividade hidráulica, eficiência fotoquímica e trocas gasosas em genótipos de soja (*Glycine max* L.) com diferentes capacidades de nodulação**. 2017. 92f. Dissertação (Mestrado Produção Vegetal). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2017.

MASTRODOMENICO, A. T.; HENDRIX, C. C.; BELOW, F. E. Nitrogen Use Efficiency and the Genetic Variation of Maize Expired Plant Variety Protection Germplasm. **Agriculture**, v. 8, n. 1, p. 1-17, 2018.

MONSOY. Variedades: M8349IPRO. Disponível em: <http://www.monsoy.com.br/variedades_monsoy/m8349-ipro/>. Acesso em: 11 fev. 2019.

NANKISHORE, A.; FARRELL, A. D. The response of contrasting tomato genotypes to combined heat and drought stress. **Journal of plant physiology**, v. 202, p. 75-82, 2016.

NASCIMENTO, S. P. do et al. Tolerância ao déficit hídrico em genótipos de feijão-caupi. **Rev. Bras. de Eng. Agríc. e Ambiental**, v. 15, n. 8, p. 853-860, 2011.

PROCÓPIO, S. O. et al. Absorção e utilização do nitrogênio pelas culturas da soja e do feijão e por plantas daninhas. **Planta Daninha**, v. 22, n. 3, p. 365-374, 2004.

PURCELL, L. C. et al. Biomass accumulation and allocation in soybean associated with genotypic differences in tolerance of nitrogen fixation to water deficits. **Plant and Soil**, v. 196, n. 1, p. 101-113, 1997.

ROSA, D. B. C. J et al. Gas exchange and antioxidant activity in seedlings of *Copaifera langsdorffii* Desf. under different water conditions. **An Acad Bras Cienc**, v. 89, n. 4, p. 3039-3050, 2017.

SANTOS, C. M. et al. Photosynthetic capacity and water use efficiency in *Ricinus communis* (L.) under drought stress in semi-humid and semi-arid areas. **An Acad Bras Cienc**, v. 89, n. 4, p. 3015-3029, 2017.

SANTOS, M. et al. Simulação de desfolhas em diferentes estádios vegetativo na cultura da soja. **Colloquium Agrariae**. v. 14, n.2, abr./jun., p. 191-197, 2018,

SERRA, A. P. et al. Influência do glifosato na eficiência nutricional do nitrogênio, manganês, ferro, cobre e zinco em soja resistente ao glifosato. **Ciência Rural**, v. 41, n. 1, 2011.

SILVA, W. D. et al. Índice de consumo e eficiência do uso da água em eucalipto, submetido a diferentes teores de água em convivência com braquiária. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 3, p. 325-335, set/dez. 2004.

SILVA, F. D. da. et al. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em plantas de berinjela sob lâminas de irrigação. **Rev. Bras. de Eng. Agríc. e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 10, p. 946-952, 2015.

STRASSER, R.J.; TSIMILLI-MICHAEL, M.; SRIVASTAVA, A. **The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples**. In: Yunus, M., Pather, U., Mohanly P. (eds.). *Probing Photosynthesis: Mechanisms, Regulation and Adaptation*. Taylor and Francis, London, p. 445-483, 2000.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888p.

TODESCHINI, M. H. et al. Eficiência de uso do nitrogênio em cultivares modernas de trigo. **Bragantia**, v. 75, n. 3, 2016.

THOMAS, A. L. Soja: tipos de crescimento da planta. UFRGS, Porto Alegre. 59p. 2018.

YOKOYAMA, A. H. et al. Índice de área foliar e SPAD durante o ciclo da soja em função da densidade de plantas e sua relação com a produtividade de grãos. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, n. 4, p. 531-538, 2018.

APÊNDICE A – Análises de variância

Tabela 2 – Resumo da análise de variância e coeficientes de variação das características avaliadas em três cultivares de soja.

Variáveis	Quadrados médios			CV (%)	
	Bloco	Cultivares	Erro		
Altura	20 DAP	9,17*	1574,32*	2,51	31,9
	35 DAP	175,75*	6814,55*	8,53	28,7
	50 DAP	1692,49*	29848,39*	71,68	27,4
	65 DAP	1711,78*	31445,97*	63,84	24,6
	80 DAP	2265,38*	30640,83*	62,11	23,0
	95 DAP	2842,10*	32686,69*	68,82	22,4
	GL	5	2	532	
Diâmetro	20 DAP	0,52*	15,96*	0,11	16,2
	35 DAP	10,43*	55,29*	0,64	19,3
	50 DAP	11,67*	57,04*	0,91	17,7
	65 DAP	13,78*	63,77*	0,96	15,7
	80 DAP	17,36*	101,09*	1,34	16,6
	95 DAP	23,14*	224,42*	2,31	19,3
	GL	5	2	532	
Massa da matéria Seca		2,80 ^{ns}	0,29 ^{ns}	6,49	21,1
Parte Aérea	GL	5	2	10	
Massa da matéria Seca de Raízes		0,18 ^{ns}	1,60*	0,25	25,2
	GL	5	2	10	
Massa da matéria Seca Total		6,66 ^{ns}	3,25 ^{ns}	8,13	19,6
	GL	5	2	10	
Relação MSR/MSPA		0,002 ^{ns}	0,016*	0,003	26,7
	GL	5	2	10	
Massa Foliar Específica		1,53e ⁻⁶ *	6,77e ⁻⁶ *	1,40e ⁻⁶	29,3
	GL	5	2	46	
Índice de Qualidade de Dickson		0,042 ^{ns}	0,757*	0,056	31,0
	GL	5	2	10	
Assimilação fotossintética de CO ₂	V5	13,53*	16,20*	9,74	22,0
	R5	11,44*	232,42*	9,25	18,1
	GL	5	2	46	

* - significativo ao nível de 5% de probabilidade.

^{ns} - não significativo.

(Continua)

(Continuação)

Tabela 2 – Resumo da análise de variância e coeficientes de variação das características avaliadas em três cultivares de soja.

Variáveis	Quadrados médios			CV (%)	
	Bloco	Cultivares	Erro		
Condutância estomática	V5	0,063*	0,014 ^{ns}	0,070	39,1
	R5	0,75*	0,172*	0,39	32,8
	GL	5	2	46	
Transpiração	V5	1,52*	49,32*	0,23	16,4
	R5	8,42*	22,97*	1,40	20,8
	GL	5	2	46	
Relação Fv/Fm	V5	0,001 ^{ns}	0,040*	0,002	7,3
	R5	0,002*	0,050*	0,001	7,5
	GL	5	2	46	
Índice Fotossintético	V5	0,22 ^{ns}	21,39*	0,79*	69,2
	R5	3,28*	252,38*	2,02*	52,4
	GL	5	2	46	
SPAD	20 DAP	28,84*	2641,08*	13,04*	13,3
	35 DAP	42,33*	202,87*	12,54*	10,0
	50 DAP	58,16*	110,70*	12,81*	9,1
	65 DAP	9,03*	528,10*	4,15*	5,4
	80 DAP	440,51*	401,39*	291,59*	5,9
	95 DAP	102,57*	3970,11*	29,38*	18,3
	GL	5	2	532	
Eficiência do Uso do Nitrogênio		14,59 ^{ns}	355,14*	31,34	24,2
	GL				
Razão de transpiração	V5	0,016*	0,119*	0,017	21,9
	R5	0,007*	0,025*	0,001	13,3
	GL	5	2	46	
Eficiência Agronômica do Uso da Água		0,004*	0,033*	0,002	26,3
	GL	5	2	10	
Número Total de Grãos		107,28 ^{ns}	9157,05*	237,05	28,1
	GL	5	2	10	
Número de Vagens		27,28*	1066,72*	32,12	22,9
	GL	5	2	10	
Peso de Mil Grãos		974,99*	5475,73*	36,09	6,3
	GL	5	2	10	
Produtividade		394038,9*	2943621,7*	17869,6	25,8
	GL	5	2	10	

* - significativo ao nível de 5% de probabilidade.

^{ns} - não significativo.

APÊNDICE B – Testes de comparação de médias

Tabela 3 – Valores médios das características avaliadas em três cultivares de soja.

Variáveis		Cultivares		
		CS01	CS02	CS03
Altura (cm)	20 DAP	11,2 a	5,7 c	10,3 b
	35 DAP	26,4 a	14,2 c	21,5 b
	50 DAP	62,7 a	37,3 c	53,4 b
	65 DAP	69,0 a	42,8 c	58,7 b
	80 DAP	72,8 a	46,9 c	62,7 b
	95 DAP	78,3 a	51,4 c	67,1 b
Diâmetro (mm)	20 DAP	2,94 a	2,38 c	2,50 b
	35 DAP	5,52 a	5,01 b	4,42 c
	50 DAP	6,51 a	6,57 a	5,57 b
	65 DAP	7,11 b	7,89 a	6,72 c
	80 DAP	7,90 b	9,02 a	7,61 c
	95 DAP	9,05 b	10,66 a	8,52 c
MSPA (g planta ⁻¹)		10,28 a	10,45 a	10,01 a
MSR (g planta ⁻¹)		2,55 ab	2,92 a	1,90 b
MST (g planta ⁻¹)		12,83 a	13,37 a	11,92 a
Relação MSR/MSPA (g g ⁻¹)		0,25 ab	0,29 a	0,19 b
MFE (g cm ⁻²)		0,0034 b	0,0044 a	0,0046 a
IQD		1,02 b	1,58 a	0,91 b
A (μmol m ⁻² s ⁻¹)	V5	15,6 a	13,7 a	14,4 a
	R5	22,5 a	20,1 b	27,2 b
E (mmol m ⁻² s ⁻¹)	V5	10,68 a	7,37 c	9,18 b
	R5	8,93 a	6,88 b	8,74 a
g _s (mol m ⁻² s ⁻¹)	V5	0,65 a	0,66 a	0,61 a
	R5	0,64 a	0,58 ab	0,77 a
Fv/Fm	V5	0,70 c	0,79 a	0,76 b
	R5	0,71 b	0,81 a	0,73 b
PI	V5	0,48 b	2,61 a	1,12 b
	R5	0,88 b	7,62 a	1,42 b

MSPA= massa da matéria seca da parte aérea; MSR= massa da matéria seca de raízes; MST= massa da matéria seca total; MFE= massa foliar específica; IQD= índice de qualidade de Dickson; A = assimilação fotossintética de CO₂; E = transpiração; g_s= condutância estomática; PI= índice fotossintético.

(Continua)

Médias seguidas pelas mesmas letras (na linha) não diferem entre si pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

(Continuação)

Tabela 3 – Valores médios das características avaliadas em três cultivares de soja.

Variáveis	Cultivares			
	CS01	CS02	CS03	
SPAD	20 DAP	31,7 c	36,9 b	39,1 a
	35 DAP	35,8 c	37,0 b	38,0 a
	50 DAP	40,5 ab	41,2 a	39,7 b
	65 DAP	46,3 b	44,1 c	47,4 a
	80 DAP	45,9 a	48,7 a	46,3 a
	95 DAP	32,2 c	41,5 a	35,8 b
EUN (g MS g N ⁻¹)		36,1 a	38,9 a	24,4 b
RT (mmol H ₂ O μmol CO ₂ ⁻¹)	V5	0,71 a	0,55 b	0,66 a
	R5	0,39 a	0,34 b	0,32 b
EAUA (kg ha ⁻¹ m ³)		0,28 b	0,39 a	0,24 b
NTG (grãos planta ⁻¹)		101,3 b	170,8 a	105,7 b
NTV (vagens planta ⁻¹)		48,1 b	69,0 a	44,1 b
PMG (g)		178,24 c	194,52 a	198,3 b
Produtividade (kg ha ⁻¹)		2 720,0 b	3 698,6 a	2 341,2 b

EUN= eficiência do uso do nitrogênio; RT= razão de transpiração; EAUA= eficiência agrônômica do uso da água; NTG= número total de grãos; NTV= número total de vagens; PMG= peso de mil grãos.

Médias seguidas pelas mesmas letras (na linha) não diferem entre si pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.