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

Aspectos produtivos e fisiológicos de cultivares de feijão irrigado

Daniel Soares Alves

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

**Piracicaba
2014**

Daniel Soares Alves
Engenheiro Agrônomo

Aspectos produtivos e fisiológicos de cultivares de feijão irrigado
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientadora:
Prof^a Dr^a **PATRICIA ANGÉLICA ALVES MARQUES**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

Piracicaba
2014

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

Alves, Daniel Soares

Aspectos produtivos e fisiológicos de cultivares de feijão irrigado / Daniel
Soares Alves. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - -
Piracicaba, 2014.
87 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2014.

1. *Phaseolus vulgaris* 2. Disponibilidade Hídrica 3. Umidade do Solo I. Título

CDD 635.652
A474a

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte -O autor"

DEDICATÓRIA

Dedico,

Primeiramente a minha avó Percília do Espírito Santo Soares (*in memorian*) faltam palavras ...

A duas companheiras que enquanto presentes não me separarei nunca! Minha esposa Paula Veloso e minha filha Maria Vitória Veloso Alves, minhas maiores riquezas;

Aos meus pais, Nelson Geraldo Alves e Sueli Soares Alves, exemplo de persistência e união;

Ao meu irmão Eduardo Henrique Soares Alves;

A Deoclécio Nazareno do Carmo pelos ensinamentos e anos de convívio profissional e pessoal;

A toda minha família e amigos especialmente minha tia Telma, sempre acolhedora e disposta a ajudar, meu padrinho Sílvio Joaquim Tavares e meu primo Silson Tavares pela ajuda durante a base de minha formação.

Ofereço,

Ao meu Deus por sempre se fazer presente, blindou-me com saúde e felicidade, concedeu-me autoestima para não desistir diante dos obstáculos, tornando-me mais forte para seguir em frente.

AGRADECIMENTOS

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas.

A minha orientadora Dra. Patricia Angélica Alves Marques, pela orientação e confiança depositada, por demonstrar persistência ao longo de desenvolvimento de suas atividades, pois sei que inicialmente em qualquer profissão é necessário percorrer o “caminho das pedras” e o tempo que parece passar tão rápido, pode ser nosso maior aliado;

A Dra Vania Moda Cirino, precisamos cada vez mais de pesquisadores como a senhora;

Ao Dr. Celso Helbel Junior pelo auxílio no início dos trabalhos;

Ao Dr. Getúlio Takashi Nagashima por viabilizar os equipamentos de análises fisiológicas em plantas;

À Diretoria de Inovação e Transferência de Tecnologia na pessoa de Marcos Valentin Ferreira Martins por possibilitar o desenvolvimento desta pesquisa no IAPAR;

Todos meus familiares, que apesar da distância física, são sempre lembrados com muito carinho e cercado de exemplos bons. Aos meus grandes amigos Thiago Assis Rodrigues Nogueira, José dos Santos Neto e Clandio Medeiros da Silva;

Ao meu primeiro orientador (graduação) Ernane Ronnie Martins por me apresentar o infinito universo da pesquisa científica;

Aos meus professores do Departamento de Engenharia de Biossistemas, Fisiologia e Bioquímica de Plantas e Centro de Energia Nuclear na Agricultura, obrigado por deixar comigo a maior herança que uma pessoa pode receber CONHECIMENTO. Especialmente, ao professor Paulo Cesar Orcheuze Trivelin, exemplo de respeito e dedicação na prática da docência e pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR) por possibilitar o desenvolvimento deste trabalho utilizando-se de toda sua estrutura;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biosistemas, Davilmar Aparecida Colevatti, Ângela Márcia Derigi Silva, Gilmar Batista Grigolon, Hélio de Toledo Gomes, Luiz Custódio Camargo e Antônio Agostinho Gozzo (Seu Antônio), obrigado pela ajuda ministrada.

Aos funcionários do Instituto Agronômico do Paraná, Abel Nestor Ribeiro, Amarildo Portela, Aparecido Rocha, João Donizeti da Costa, Luís Carlos Marin, Nicanor dos Anjos Rezende, Adevanir Martins dos Santos, Sinésio Lucas Camilo, Paulo Cezar Lopes entre outros.

Aos amigos que ajudaram e compartilharam conhecimentos durante esta etapa, Ezaude Aparecido Pedroso, Ademir Alves Ferreira, Leonoardo Godoy Androcioli, Jefferson Vieira José, Hermes da Rocha, Marinaldo Ferreira Pinto, Eduardo Marano, Ezequiel Saretta, Antônio Pires de Camargo, Alexandro Cláudio dos Santos Almeida, Daniel Leal, Rafaelly Santos, Catariny Aleman, Marcos Amaral, Bruno Marçal, Bruno Lena, Fernando Cajurú, Acácio Perboni, Euzímio Fraga, Robson Mauri, Ricardo Gava, pelas valorosas contribuições, dentre outros que não foram aqui mencionados.

Muito Obrigado!

“É um paradoxo a Terra se mover ao redor do Sol e a água ser constituída por dois gases altamente inflamáveis. A verdade científica é sempre um paradoxo, se julgada pela experiência cotidiana que se agarra à aparência efêmera das coisas”.

(Karl Marx)

SUMÁRIO

RESUMO..	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 Exigência hídrica da cultura do feijão	21
2.2 Absorção de água pelas plantas	23
2.3 Crescimento radicular.....	24
2.4 Atributos físico-químicos do solo e o desenvolvimento radicular	25
2.5 Fotossíntese e fluorescência da clorofila	28
2.6 Efeito da temperatura sobre o desenvolvimento das plantas	29
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	31
3.1 Localização e caracterização da área experimental	31
3.2 Caracterização física e química do substrato.....	31
3.3 Controle fitossanitário	32
3.4 Caracterização hídrica do substrato	33
3.5 Tratamentos e delineamento experimental	34
3.6 Instalação e montagem do experimento	35
3.7 Manejo da irrigação	36
3.8 Avaliações	38
3.8.1 Aspectos produtivos	38
3.8.2 Aspectos fisiológicos.....	38
3.9 Análise estatística	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1 Monitoramento da temperatura e irrigação	41

4.2 Aspectos produtivos	44
4.2.1 Fitomassa seca de folhas (FSF).....	47
4.2.2 Fitomassa seca de caule (FSC).....	48
4.2.3 Fitomassa seca de legume (FSL)	48
4.2.4 Fitomassa seca da parte aérea (FSPA)	49
4.2.5 Fitomassa seca total da planta (FSTP)	49
4.2.6 Fitomassa seca da raiz (FSR)	50
4.2.7 Rendimento de grãos (RG) e Índice de colheita (IC).....	53
4.3 Aspectos fisiológicos	55
4.3.1 Fotossíntese (A)	55
4.3.2 Transpiração (E) e Condutância Estomática (g_s)	62
4.3.3 Eficiência da Fotossíntese (F_v/F_m)	69
4.3.4 Eficiência no uso da água instantânea (A/E)	71
5 CONCLUSÕES	77
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
REFERÊNCIAS.....	81

RESUMO

Aspectos produtivos e fisiológicos de cultivares de feijão irrigado

A cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) apresenta posição de destaque no agronegócio brasileiro e na alimentação da população; a manutenção de elevados índices produtivos está condicionada a utilização da irrigação de forma racional e na escolha adequada das cultivares. Diante disso, torna-se fundamental o conhecimento das respostas fisiológicas e produtiva de diferentes cultivares de feijão submetida a três níveis de disponibilidade hídrica. Tais conhecimentos ainda são pouco difundidos e necessitam de pesquisas para sua melhor compreensão. O objetivo do presente trabalho foi estudar a resposta dos aspectos produtivos e fisiológicos de cultivares de feijão com monitoramento e manejo da irrigação diferenciados. O experimento foi conduzido em condições controladas no Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), em Londrina, PR com delineamento de blocos ao acaso em esquema fatorial e cinco repetições, constando de três cultivares de feijão e três níveis de disponibilidade hídrica no solo, monitorada por tensiômetro instalado a 0,15; 0,20 e 0,30 m de profundidade. Foram avaliados a fitomassa seca das folhas, caule, legume, parte aérea, raízes e total; rendimento de grãos e índice de colheita; fotossíntese, concentração interna de carbono no mesófilo foliar, transpiração e condutância estomática, eficiência da fotossíntese, e eficiência no uso da água instantânea e extrínseca. Os resultados indicaram variação em relação à produção de fitomassa seca de folhas, parte aérea, total, rendimento de grãos e índice de colheita, com maiores valores para a cultivar IAPAR 81 submetida à disponibilidade hídrica total de 463 mm. A cultivar IPR Tangará apresentou resultado semelhante para característica índice de colheita, nas demais não apresentou diferença com disponibilidade hídrica total de 463 e 547 mm, considerando as características citadas anteriormente. Todas as características avaliadas foram menores para a cultivar IPR Curió, a qual não apresentou diferenças com disponibilidade hídrica total de 329 e 404 mm na produção de fitomassa seca da parte aérea, total, rendimento de grãos e índice de colheita. O desenvolvimento radicular das cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará foram semelhantes, diferentemente da cultivar IPR Curió que apresentou menor crescimento. Houve comportamento diferenciado das três cultivares avaliadas e maior capacidade de recuperação das atividades fisiológicas para as cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará em comparação a cultivar IPR Curió; aos 62 dias após a semeadura, foi observada maior redução nos tratamentos cujo monitoramento da irrigação foi realizado a 0,30 m de profundidade para as cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará. A cultivar IPR Curió apresentou redução gradativa dessas características ao longo do ciclo de desenvolvimento. Considerando os resultados conclui-se que as cultivares de feijão apresentaram resposta diferenciada em relação às características produtivas e fisiológicas, a maior produção de grãos ocorreu com disponibilidade hídrica monitorada a 0,20 e 0,30 m de profundidade, as cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará apresentaram capacidade de recuperação das atividades fisiológicas após um período de maior estresse; a cultivar IPR Curió apresentou menor eficiência no uso da água. A cultivar IAPAR 81 é mais adequada para locais sujeitos à deficiência hídrica e as cultivares IPR Tangará e IPR Curió serão mais responsivas em sistemas de produção irrigados; não foram observadas alterações nocivas ao aparato fotossintético das cultivares, em função dos tratamentos.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris*, Disponibilidade hídrica, Umidade do solo

ABSTRACT

Productive and physiological aspects of beans irrigated cultivars

The bean crop (*Phaseolus vulgaris* L.) has a prominent position in the Brazilian agribusiness and food of the population; the maintaining of high production rates is dependent upon use of irrigation rationally and in choosing suitable of cultivars. Therefore, it is necessary to know the physiological and productive responses of bean cultivars under three levels of water availability. Such knowledge is still not disseminated and need research for better understanding. The aim of this work was to study the response of productive and physiological aspects of bean cultivars with different monitoring and management of irrigation. The experiment was conducted in Agronomic Institute of Paraná State (IAPAR) in Londrina, PR with a randomized block design in a factorial arrangement with five replications, consisting of three bean cultivars and three levels of soil water availability, monitored by tensiometer installed 0.15; 0.20 and 0.30 m depth. Were evaluated: dry biomass of leaves, stems, pod, aerial part, shoots, and total; grain yield and harvest index; photosynthesis, internal carbon concentration in mesophyll, transpiration, stomatal conductance, photosynthesis efficiency, and efficiency in the use of instant and extrinsic water. The results indicated variation in relation to dry biomass production of leaves, aerial part, total, grain yield and harvest index, with higher values for IAPAR 81 cultivar with total water availability of 463 mm. The IPR Tangará cultivar showed similar results of characteristics to harvest index but in the other characteristics showed no difference in total water availability of 463 and 547 mm, considering the characteristics previously mentioned. All characteristics were smaller to IPR Curió cultivar, which no showed differences in total water availability of 329 and 404 mm in the dry biomass production of aerial parts, total grain yield and harvest index. The root development of the IAPAR 81 and IPR Tangará were similar, unlike IPR Curió cultivar which showed lower growth. There was a differential behavior of the three cultivars and greater resilience of physiological activities for IAPAR 81 and IPR Tangará cultivars compared to IPR Curió cultivar; at 62 days after seedling, greater reduction in irrigation treatments whose monitoring was carried out at 0.30 m depth for IAPAR 81 and IPR Tangará cultivars was observed. The IPR Curió cultivar showed gradual reduction of these characteristics throughout the development cycle. Considering the results it is concluded that the cultivars showed different responses in relation to the productive and physiological characteristics, the largest grain production occurred with water availability monitored at 0.20 and 0.30 m depth, the IAPAR 81 cultivars and IPR Tangará showed resilience of physiological activity after a period of increased stress; IPR Curió cultivar showed lower water efficiency use. The IAPAR 81 cultivar is more suitable for locations where the water deficit is frequent and the IPR Tangará and IPR Curió cultivars be more responsive in irrigation systems production; no changes harmful was observed to the photosynthetic apparatus of cultivars, independent of the treatments.

Keyword: *Phaseolus vulgaris*, Water availability, Soil moisture

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Casa de vegetação utilizada para experimentação	31
Figura 2 - Caracterização hídrica do solo: (A) Determinação do peso seco, (B) Recipientes sendo saturados por ascensão capilar, (C) Recipientes saturados com a porção superior fechada para evitar perda de água por evaporação	34
Figura 3 - Instalação do experimento: (A) Detalhe da parcela experimental e das cinco subdivisões, (B) Vista parcial do ensaio, (C) Detalhe do tensiômetro instalado na parcela	35
Figura 4 - Sistema de irrigação: (A) Vista parcial do sistema de irrigação, (B) Detalhe do posicionamento dos pontos de emissão de água e tensiômetro, (C) Leitura do tensiômetro e posicionamento da planta na parcela experimental.....	36
Figura 5 - Temperatura máxima, mínima e média registrada no interior da casa de vegetação durante a condução do experimento.....	41
Figura 6 - Curva de retenção da água no substrato.....	41
Figura 7 - Vazão obtida pela avaliação de 48 emissores utilizados para irrigação das parcelas experimentais	42
Figura 8 - Frequência acumulada e valores observados das vazões em $L\ h^{-1}$ em comparação à distribuição normal acumulada dos emissores utilizados no experimento	42
Figura 9 - Resultados da umidade no substrato: (A) Tensiômetro a 0,15 m de profundidade; (B) tensiômetro a 0,20 m de profundidade; (C) tensiômetro a 0,30 m de profundidade; (D) Agrupamento de todos os resultados e perfil de umidade na capacidade de vaso e a tensão de 30 kPa	43
Figura 10 - Irrigação total aplicada (mm) de acordo com os tratamentos propostos para as três cultivares de feijão	44
Figura 11 - (A), (B) e (C), Fitomassa seca de raízes (g) de cultivares de feijão em camadas do perfil do substrato em diferentes níveis de disponibilidade hídrica. (D) Fitomassa seca total de raízes em função do monitoramento da irrigação a 0,15; 0,20 e 0,30 m de profundidade. Mesma letra minúscula e maiúscula indicam médias sem diferença estatística entre cultivares e tratamentos, respectivamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade	52
Figura 12 - Variação da Fotossíntese ao longo do ciclo de desenvolvimento das plantas de feijão com monitoramento da irrigação nas profundidades de 0,15; 0,20 e 0,30 m. Mesma letra minúscula e maiúscula indicam médias sem diferença estatística entre cultivares e tratamentos, respectivamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	58

- Figura 13 - Transpiração das cultivares de feijão com tensiômetro posicionado a 0,15; 0,20 e 0,30 m de profundidade. Mesma letra minúscula e maiúscula indicam médias sem diferença estatística entre cultivares e tratamentos, respectivamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade..... 64
- Figura 14 - Condutância estomática de cultivares de feijão com manejo da irrigação em função dos tensiômetros posicionados a 0,15; 0,20 e 0,30 m de profundidade. Mesma letra minúscula e maiúscula indicam médias sem diferença estatística entre cultivares e tratamentos, respectivamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade..... 66
- Figura 15 - Resultados da Eficiência da Fotossíntese (F_v/F_m) com monitoramento da irrigação nas profundidades de 0,15; 0,20 e 0,30 m em três cultivares de feijão. Mesma letra minúscula e maiúscula indicam médias sem diferença estatística entre cultivares e tratamentos, respectivamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade..... 71
- Figura 16 - Eficiência Instantânea no Uso da Água ($EU_{Ainstantânea}$) de cultivares de feijão com manejo da irrigação em função dos tensiômetros posicionados a 0,15; 0,20 e 0,30 m de profundidade. Mesma letra minúscula e maiúscula indicam médias sem diferença estatística entre cultivares e tratamentos, respectivamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade..... 73
- Figura 17 - Resultados da Eficiência do Uso da Água Extrínseca com tensiômetro posicionado a 0,15; 0,20 e 0,30 m em três cultivares. Mesma letra minúscula e maiúscula indicam médias sem diferença estatística entre cultivares e tratamentos, respectivamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade..... 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características físico e química do substrato utilizado no experimento	32
Tabela 2 - Produtos fitossanitários aplicados na cultura do feijão durante o período experimental.....	33
Tabela 3 - Resultados do teste F para Fitomassa Seca de Folhas, caule, legume, parte aérea, raízes, total da planta, rendimento de grãos e índice de colheita para três cultivares de feijão submetida a níveis de disponibilidade hídrica no solo.....	44
Tabela 4 - Resultados do teste F para Fitomassa seca da raiz até a profundidade de 1,00 m para três cultivares de feijão submetida a níveis de disponibilidade hídrica	45
Tabela 5 - Resultados médios em (g) para FSF, FSC, FSL, FSPA, FSTR, FSTP, RG e IC para três cultivares de feijão submetida a níveis de disponibilidade hídrica	46
Tabela 6 - Teste F para fotossíntese líquida avaliada em três cultivares de feijão submetidas a diferentes níveis de disponibilidade hídrica.....	56
Tabela 7 - Resultados do teste F para Concentração Interna de Carbono no Mesófilo Foliar (Ci) avaliada em três cultivares de feijão submetidas a níveis de disponibilidade hídrica	59
Tabela 8 - Concentração Interna de Carbono (Ci) em função da profundidade do sensor e dias após a semeadura	60
Tabela 9 - Teste F para Transpiração (E) e Condutância Estomática (g_s) em três cultivares de feijão submetidas a níveis de disponibilidade hídrica.....	63
Tabela 10 - Teste F para Eficiência da Fotossíntese (F_v/F_m) avaliada em três cultivares de feijão submetidas a níveis de disponibilidade hídrica	69
Tabela 11 - Teste F para Eficiência Instantânea no Uso da Água ($EU_{Ainstantânea}$) em três cultivares de feijão submetidas a níveis de disponibilidade hídrica	72
Tabela 12 - Eficiência no Uso da Água Extrínseca do feijão em função da profundidade do sensor e da idade das plantas (DAS).....	75

1 INTRODUÇÃO

A cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) apresenta posição de destaque no agronegócio brasileiro e, sobretudo, na alimentação da população. No Brasil, a produtividade média foi de 913,00 e 1.033,00 kg ha⁻¹ nas safras 2012/2013 e 2013/2014. O Paraná destaca-se pela maior produção, no mesmo período citado anteriormente, o estado produziu 658,4 e 808,9 mil toneladas do grão, respectivamente, registrando aumento de 23%. Nesse contexto, Minas Gerais e Mato Grosso ocupam o segundo e terceiro lugares no ranking produtivo, com produção de 564,8; 594,4 e 535; 534,1 mil toneladas, considerando as safras de 2012/2013 e 2013/2014 (CONAB, 2014).

Na entressafra, o feijão é uma das principais culturas plantadas na região Central e Sudeste do Brasil. Um dos fatores diretamente relacionado ao aumento da produtividade dessa cultura está no uso da irrigação, que quando realizada de forma adequada, supre as necessidades hídricas da cultura de acordo com a fase fenológica e suas exigências específicas (ÁVILA et al., 2010). No entanto, o que se observa é o uso indiscriminado da irrigação pela maioria dos usuários dessa tecnologia, comprometendo os recursos hídricos.

Anualmente, são disponibilizadas no mercado novas cultivares de feijão, com maior potencial produtivo, resistentes a determinadas doenças, tolerantes a temperaturas elevadas e com hábito de crescimento determinado ou indeterminado. Essas características são importantes para o desenvolvimento da agricultura, favorecendo a inserção da cultura em diferentes sistemas de produção e na abertura e manutenção de novos mercados. Porém, é crucial entender e conhecer como o manejo da irrigação pode ser utilizado para potencializar a produtividade do feijão, e quais alterações esse manejo poderá ocasionar considerando o sistema radicular da cultura. Para aumentar a produtividade agrícola é fundamental manejar racionalmente o recurso hídrico utilizado na agricultura irrigada, possibilitando economizar energia e maximizar a produção vegetal por unidade de capital investido. No entanto, a irrigação precisa ser aplicada dentro de critérios de eficiência e uniformidade, suprimindo total ou parcialmente as necessidades hídricas e específicas de cada cultura.

Segundo Figueiredo et al. (2008), os sistemas de irrigação precisam ser “otimizados”. Nesse contexto, é necessário considerar as relações de custo e lucratividade que não são considerados nos programas tradicionais, destinados ao manejo da irrigação, cuja a prática tem objetivo de maximizar a produtividade; ou seja, irrigar para maximizar o lucro é uma atividade mais complexa.

Nos últimos anos a humanidade tem apresentado preocupação constante com políticas de uso da água, e ainda são insuficientes os estudos direcionados ao seu manejo e as respostas fisiológicas proporcionadas às culturas. Várias pesquisas direcionadas ao melhoramento genético de plantas de feijão visando cultivares mais adaptadas às condições ambientais vigentes, mais responsivas à adubação, resistentes a pragas e doenças, são realizadas. Porém, nestas pesquisas pouco se considera a irrigação e seus efeitos sobre o crescimento radicular da cultura, fato este que pode incrementar substancialmente a eficiência do uso da água, fertilizantes e a produtividade. As raízes, além de atuarem como suporte às plantas, promovem a absorção de água e nutrientes, devendo receber atenção relevante da pesquisa científica. Embora o desenvolvimento radicular seja controlado por fatores genéticos, seu crescimento pode ser influenciado por fatores químicos, físicos e biológicos do solo; devendo ser consideradas também a temperatura e as práticas culturais como rotação de culturas.

Sendo assim, a hipótese do presente trabalho apoiou-se na seguinte premissa: Se plantas de feijão apresentam resposta produtiva em função da disponibilidade de água no solo então existe uma profundidade ideal de monitoramento da água no solo ideal para expressão do máximo potencial genético das cultivares, considerando aspectos produtivos e fisiológicos. Diante disso, o objetivo do presente trabalho foi estudar a resposta dos aspectos produtivos e fisiológicos de cultivares de feijão irrigado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Exigência hídrica da cultura do feijão

As culturas necessitam de água para expressão do potencial produtivo. Ucar et al. (2009) avaliaram a necessidade hídrica da cultura do feijão nas diferentes fases de crescimento durante dois anos consecutivos na Turquia, e concluíram que o maior rendimento de grãos foi obtido quando não houve supressão da irrigação em nenhuma das fases fenológicas, alcançando produtividades de 1.940 e 2.430 kg ha⁻¹; em contrapartida, menores produtividades foram obtidas com a supressão da irrigação na fase inicial de desenvolvimento e durante o crescimento vegetativo, proporcionando rendimentos iguais a 170 e 270 kg ha⁻¹, no primeiro e segundo ano respectivamente. A supressão da irrigação na fase inicial de desenvolvimento, após a germinação das sementes, não garantiu índices produtivos durante os dois anos de avaliação. Em outro estudo, variando as lâminas de irrigação, Gomes et al. (2012) relataram resposta linear para produtividade no cultivo do feijão irrigado, alcançando produtividades de 785 e 2.224 kg ha⁻¹ nos tratamentos sem irrigação e com aplicação de 333 mm de água respectivamente, na região noroeste do estado do Paraná, no ano agrícola de 2010. Em termos de consumo hídrico, esses resultados corroboram com o preconizado por Doorenbos e Kassam (1994), que indicam como necessidade hídrica para cultura do feijão valor variável entre 300 e 500 mm.

Conhecer as necessidades hídricas das culturas é tão importante quanto às características físico – hídricas do solo; assim, é factível identificar a capacidade de uso da água disponível e sua conversão em produtividade de grãos. Nesse contexto, Santana et al. (2009) avaliaram o desempenho produtivo do feijão, cultivar Pérola, no sul de Minas Gerais assumindo diferentes tensões de água no solo. Na condição em que o ensaio foi conduzido, os resultados sugerem que a tensão de 22 kPa proporcionou produtividade de 2.725,90 kg ha⁻¹. Quando as plantas foram submetidas à tensão de 30 kPa a produtividade foi de 2.838,75 kg ha⁻¹.

Além do fator disponibilidade hídrica afetar direta e proporcionalmente a produtividade, geralmente a cultura sofre os efeitos fisiológicos do estresse precocemente. Algumas características fisiológicas podem ser utilizadas para identificar a resposta das plantas quando submetidas ao estresse hídrico, permitindo identificar a necessidade de água mais adequada para o crescimento e produção. Ninou et al. (2012) avaliaram as respostas fisiológicas e produtivas de duas cultivares de feijão em cinco níveis de irrigação, baseadas na

evapotranspiração da cultura (E_t) no nordeste da Grécia. Para os regimes de irrigação com 100 e 75% da E_{t_c} ocorreu maior rendimento de sementes, área foliar, níveis de clorofila nas folhas e fotossíntese líquida, em comparação com os menores regimes de irrigação representados pelos tratamentos 50, 25% da E_{t_c} , e 0% (sem irrigação). A eficiência no uso da água também foi maior para os tratamentos com maior regime de irrigação. Os autores relataram que a produtividade foi de 1.476,3 e 1.362,3 kg ha⁻¹ nos tratamentos de 100 e 75% da E_{t_c} e para os tratamentos correspondentes a 25 e 0% da E_{t_c} as produtividades resultaram em 1.000,3 e 919,4 kg ha⁻¹, respectivamente. Cabe ressaltar que, no tratamento correspondente a 0% da E_{t_c} foram registrados índices pluviométricos iguais a 85,2 mm. No regime de 50%, a produtividade registrada foi intermediária e igual a 1.362,3 kg ha⁻¹. Em relação aos níveis de clorofila, os valores foram crescentes conforme eram elevados a porcentagem da irrigação em relação à E_{t_c} e iguais a 38,9 e 28,2 nos tratamentos 100 e 0%, respectivamente. Os índices de área foliar comparados com o tratamento controle foram de 1,53; 1,48 e 0,82 para os tratamentos irrigados a 100, 75 e 0% da E_{t_c} , respectivamente.

Seguindo a mesma tendência de pesquisa, Bourgault et al. (2010) avaliaram, em casa de vegetação em Quebec - Canadá os impactos da irrigação em duas espécies de feijão *Phaseolus vulgaris* L. e *Vigna radiata* L. considerando diferentes fatores de depleção de água no solo de 0,45; 0,60 e 0,70; definindo três níveis distintos de estresse hídrico, classificados como: recomendado, moderado e severo, respectivamente. Observou-se, redução do peso médio das sementes de 4,20; 1,87 e 0,83 g planta⁻¹, para a espécie *Phaseolus vulgaris* L. e de 6,10; 3,77 e 2,33 g planta⁻¹ para espécie *Vigna radiata* L. em três safras consecutivas, respectivamente. As taxas de fotossíntese foram maiores nas cultivares da espécie *Vigna radiata* L. em comparação a espécie *Phaseolus vulgaris* L. apresentando valores de aproximadamente, 14 e 16,5; 14,1 e 16; 10,1 e 14 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, para os diferentes níveis de depleção de água, respectivamente; além disso, para uma mesma taxa de transpiração para cultivares da espécie *Vigna radiata* L. resultaram maiores taxas de fotossíntese, acompanhada de redução na área foliar. Estas informações sugerem maior capacidade de adaptação para condições de déficit hídrico no solo e alterações morfológicas visando melhor adaptação às condições de déficit hídrico impostos pelos tratamentos; consequentemente reduzindo as taxas de transpiração, aumentando a eficiência no uso da água para essa espécie.

Plantas de feijão apresentam dois mecanismos principais de adaptação às condições de baixa disponibilidade de água. Um desses mecanismos é a capacidade da planta de desenvolver um excessivo sistema radicular, com raízes de alta condutividade hidráulica para maior captação de água. O outro mecanismo é a capacidade de controlar o grau de abertura e de

fechamento estomático que regula o potencial de água da planta, diminuindo as perdas de água (SUBARAO et al., 1995). Sistema radicular abundante e não muito profundos, são importantes para absorção de água e nutrientes; igualmente, esta característica contribui para adaptação das plantas em condições de deficiência hídrica ou a locais onde os períodos de seca são alternados com períodos adequados chuva (HO et al., 2005).

Seguindo estas pressuposições, Polanía et al. (2009) estudaram, em casa de vegetação no Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT – Colômbia) o comportamento de 16 genótipos de feijão em condições de suprimento hídrico próximo a 80% da capacidade de campo do solo e em condições de déficit (sem irrigação); avaliaram o conteúdo de clorofila, teor de carboidratos totais não estruturais, área foliar, biomassa da raiz, parte aérea e total. Os resultados possibilitaram a identificação de três genótipos promissores para regiões de déficits hídricos frequentes. Nesse trabalho, 93,3% dos cultivares apresentaram aumento nos teores de clorofila e, no caso dos carboidratos totais não estruturais, a única tendência foi de maiores concentrações nos ramos, sugerindo menor mobilidade na planta, estas duas variáveis foram percebidas quando as plantas foram submetidas ao estresse hídrico e comparadas com plantas sob regime de irrigação plena. Em relação à área foliar, três genótipos destacaram-se em condições de estresse e outros quatro apresentaram maior plasticidade genética, sobressaindo em condições de estresse ou submetido à irrigação. Avaliando a biomassa radicular, as maiores considerações nortearam as cultivares que, em condições de estresse, desenvolveram raízes mais finas, importantes na absorção de água e nutrientes, devido à elevada área superficial por unidade de massa.

2.2 Absorção de água pelas plantas

Considerando a agricultura irrigada, é necessário compreender as relações entre a absorção de água e a produção das culturas, ou seja, como ocorre equilíbrio entre o suprimento de água pelo solo, visando satisfazer a demanda hídrica proporcionada pela atmosfera. Existem duas forças que regulam a absorção de água pelas raízes: a força osmótica e as forças hidrostáticas. Esta última, geralmente é coordenada pelo processo de transpiração. Os processos osmóticos estão sobre controle das forças de pressão radicular, representados pelo transporte ativo de solutos ou biossíntese de novos compostos (KNIPFER & FRICKE, 2011). Essas forças, osmótica e hidráulica, irão atuar quando da ocorrência de um fluxo contínuo de energia no sistema solo-planta-atmosfera, e do ponto de vista fisiológico, independente da condição ambiental, destaca-se a função das aquaporinas que tem sido relatada como uma das principais

proteínas relacionadas ao transporte de água pelas plantas (GASPAR, 2011). O primeiro relato das aquaporinas, em plantas, foi feito por Maurel (1997) descrita como uma membrana intrínseca de proteínas encontradas em todos os organismos vivos; estas proteínas facilitam a passagem de água pelos poros das membranas e consequentemente sua absorção.

Visando quantificar a capacidade de captura de água pelo sistema radicular das plantas (ϕ), o modelo de King (2003) utiliza a relação entre umidade do solo o comprimento e a densidade do sistema radicular distribuído nas diferentes camadas do perfil, verticalmente. O valor (ϕ) calculado é apresentado por uma constante k que expressa algumas condições ambientais e fisiológicas dos vegetais direcionados aos processos de absorção de água; consequentemente, valores elevados de k representam culturas com elevada capacidade de absorção de água para um dado valor de comprimento e densidade de raízes. Estudos conduzidos por Monti & Zatta (2009), retratando a distribuição do sistema radicular de diferentes culturas como forma de incrementar os estoques de carbono no solo, concluíram que plantas de *Miscanthus x giganteus*, sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), cana do reino (*Arundo donax* L.) e gramínea da espécie (*Panicum virgatum* L.) apresentaram valores de k iguais a 2,50; 1,02; 0,54 e 0,31; respectivamente. Nessa sequência, a sensibilidade das plantas à falta de água é crescente conforme o valor de k aumenta; de forma contrária, plantas com menor valor de k são capazes de recuperar melhor água disponível no solo.

2.3 Crescimento radicular

Em condições de estresse hídrico, o solo não reduz sua umidade a uma mesma taxa nas diferentes camadas do seu perfil; inicialmente, a secagem é mais pronunciada superficialmente, estendendo-se para os perfis mais profundos. Assim, plantas capazes de desenvolver o sistema radicular em profundidade, usualmente, podem ser mais tolerantes a maiores períodos de seca (ALSINA et al., 2011). O crescimento radicular é dependente da disponibilidade de água, de forma que a umidade do solo é fundamental para a atividade metabólica das células radiculares envolvidas no processo de alongação e crescimento. Quando a raiz desenvolve-se em condições inadequadas de umidade, suas células perdem a turgescência significativamente e a taxa de expansão é reduzida. Entretanto, pode ocorrer um ajuste osmótico quando a restrição hídrica é imposta gradativamente, durante o processo denominado aclimação; dessa forma, tanto as raízes como a parte aérea podem manter baixo o potencial hídrico sem perda do turgor ou degeneração celular (LYNCH & LEIJ, 2012).

O crescimento radicular em resposta ao suprimento de água é denominado hidrotropismo e o desenvolvimento das raízes em relação ao crescimento da parte aérea é acompanhado da redução do potencial hídrico no solo. As raízes crescem lateralmente em resposta a umidade do solo e particularmente com alteração do potencial osmótico. O conteúdo de água determina a resistência do solo e aumenta à medida que o processo de secagem acentua, conduzindo a uma impedância física ao crescimento radicular, caso a umidade não seja restabelecida (CASTRO, et al., 2008)

Segundo Wasson et al. (2012), a agricultura precisa caminhar em direção a um menor uso da água e utilizar cada vez mais àquela armazenada no solo e disponível nas camadas mais profundas, potencializando a água aplicada pela irrigação ou advinda das chuvas. O aumento do sistema radicular em profundidade pode ser resultado de maiores taxas de alongação celular, resultando em raízes mais vigorosas e ou crescidas em ângulo mais reduzido. Essa última característica, de acordo com Liao et al. (2001); Lynch & Brown (2001) e Lynch (2011), tem sido utilizada por programas de melhoramento do feijão; porém, visando cultivares com raízes concentradas na superfície do solo, melhorando a capacidade de absorção de fósforo. Conclui-se que, o ângulo das raízes podem definir sua profundidade e distribuição. White & Kirkegaard (2010) destacaram a forte influência da estrutura e umidade do solo. Além disso, para Boyer et al. (2010), a formação de raízes vigorosas é necessária para a translocação constante de fotoassimilados provenientes da parte aérea para garantir taxas de crescimento e alongação celulares; consequentemente, o sistema radicular e parte aérea tornam-se dependentes e o seu vigor vai promover o desenvolvimento adequado da parte aérea; desse modo fotoassimilados produzidos serão disponibilizados para as raízes, melhorando o rendimento das culturas.

Utilizando dados históricos de precipitação, Lilley & Kirkegaard (2011) observaram crescimento de raízes de trigo (*Triticum aestivum* L.) a uma taxa de 20%, resultando em maior profundidade e maior eficiência no uso da água disponível em camadas mais profundas; até 0,6 m. O desenvolvimento de raízes em profundidade aumenta o volume de solo explorado e um maior grau de ramificações é necessário para incrementar a absorção de água e nutrientes. O maior volume de ramificações está na dependência dos assimilados translocados da parte aérea em direção às raízes.

2.4 Atributos físico-químicos do solo e o desenvolvimento radicular

O crescimento das raízes pode ser afetado pela qualidade física do solo. Solos compactados tem alteração na densidade, porosidade e na resistência à penetração,

influenciando diretamente no desenvolvimento radicular. No caso da soja (*Glycine max* L.) a cultura foi influenciada pela compactação do solo e níveis elevados de irrigação; esses fatores foram determinantes para redução da altura das plantas e da produtividade; essa última foi máxima quando a resistência do solo à penetração apresentou valor de 0,71 Mpa. Segundo os autores, o aumento da compactação proporciona aumento no diâmetro das raízes, o que é prejudicial ao desenvolvimento do sistema radicular (OLIVEIRA et al., 2012).

Considerando ainda os atributos físicos do solo, Freddi et al. (2009) relataram correlação negativa para os parâmetros matéria seca, densidade e diâmetro das raízes com a produtividade no cultivo do milho irrigado. Nessa ocasião, a resistência do solo à penetração nos valores de 1,23 a 1,43 Mpa proporcionaram maior desenvolvimento do sistema radicular, sobretudo na massa de matéria seca e na densidade de raízes respectivamente. Além da qualidade física do solo deve-se ressaltar a contribuição que os nutrientes presentes podem proporcionar ao ambiente radicular, ocasionando mudanças nas características das raízes, melhorando a nutrição dos vegetais e a produtividade (CHAPMAN et al., 2012).

Outra realidade ambiental que precisa ser considerada é a condição química do solo: estudo conduzido por Lavres et al. (2009) foi conclusivo em evidenciar alterações na anatomia e ultraestrutura radicular de três cultivares de soja (*Glycine max* L.), Santa Rosa, IAC – 15, IAC – Foscari 31. Os autores mencionaram que tanto o excesso quanto a deficiência de Mn podem afetar diferentemente cada genótipo avaliado e que cada genótipo pode apresentar distintas formas de adaptação. Nesse caso, a dose de $0,5 \mu \text{mol L}^{-1}$ de Mn proporcionou desorganização dos vasos do xilema nas cultivares Santa Rosa e IAC – 15. Quando as cultivares foram submetidas à dose de $2,0 \mu \text{mol L}^{-1}$ o diâmetro dos vasos do xilema nas raízes foram superiores para a cultivar IAC – Foscari em comparação com as outras duas cultivares estudadas, ou seja, dependendo do nível de Mn disponível o mesmo pode afetar o diâmetro do sistema radicular comprometendo o desempenho fisiológico das plantas.

No cultivo do feijão, a prática da calagem pode contribuir para a melhoria do ambiente radicular: Em estudo conduzido em casa de vegetação por Marques et al. (2004) em Botucatu – SP concluíram que, o crescimento do sistema radicular das plantas de feijão pode ser potencializado com a calagem do solo. Nesse ensaio, a cultivar Pérola mostrou-se mais tolerante à baixa saturação por bases; porém, o máximo crescimento radicular foi observado na saturação por bases de 43% tanto para a cultivar Pérola como para as cultivares Campeão 1 e Carioca. Além disso, os autores relataram que a calagem promove maior crescimento da parte aérea e em condições de acidez elevada as raízes têm diâmetro reduzido e aumentam o comprimento. Nesse mesmo contexto, Pértile (2011) avaliou o efeito do calcário e resíduo

alcalino proveniente da indústria de celulose sobre os atributos físicos e químicos do solo, e relatou que não houve interferência desse insumo na estrutura do solo, e sim benefícios químicos que conduziram a um maior crescimento das raízes das plantas de feijão. Segundo Silva et al. (2011), a aplicação de 100 mg dm^{-3} de Ca favoreceu o crescimento do sistema radicular e da parte aérea, concomitante à redução da toxidez de alumínio disponível; este crescimento foi reduzido na concentração de 200 mg dm^{-3} .

Avaliando o crescimento de plantas de feijão, cultivar Pérola, em diferentes potenciais osmóticos, Coelho et al. (2010) relataram que o crescimento inicial foi afetado. Nesse estudo, a massa seca de raízes foi menor no potencial de $-1,2 \text{ Mpa}$; o maior crescimento radicular foi observado no potencial de $-0,3 \text{ Mpa}$ na presença de cálcio. De acordo com os autores, o cálcio pode potencializar o crescimento das raízes. Este fato é constatado por Yang & Poovaiah (2003) que defenderam a ideia que o íon Ca^{2+} pode promover, por meio de proteínas (calmodulinas), alguns processos celulares relacionados com a reação de plantas a estresses bióticos e abióticos.

Haydon et al. (2011) inferiram que na expressão de genes relacionados ao transporte de água, solutos como sacarose, micronutrientes e íons Ca^{2+} podem contribuir para a interação entre a parte aérea e as raízes, potencializando o desenvolvimento das plantas. Além do cálcio, os níveis de fósforo podem afetar o desenvolvimento radicular das plantas de feijão. Nesse caso, Lana et al. (2006) relataram aumento na matéria seca das raízes em plantas de feijão quando a dose de P_2O_5 passou de 24 para 120 mg dm^{-3} , utilizando as cultivares BAT 477, Carioca MG, Emgopa 201, Jalo Precoce, Pérola, Rosinha, Roxa, Xamego. Em média o incremento na matéria seca das raízes foi de 44,74%.

Sendo assim, é essencial o conhecimento das exigências nutricionais das cultivares, uma vez que o processo de salinização poderá ocasionar perdas irreversíveis na lavoura, tais fatores quando associados a temperaturas elevadas, podem promover efeitos sobre as raízes. Dutra et al. (2011) concluíram que o aumento da temperatura de 27 para 42°C associada a aplicação de $100 \mu\text{mol}$ de NaCl, promoveu redução da matéria seca total em 20,9%, das plantas de feijão. Nas raízes, houve maior acúmulo de Na, que variou de pouco mais que $1800 \text{ mmol Na}^+ \text{ kg}^{-1}$ para quase $2400 \text{ mmol Na}^+ \text{ kg}^{-1}$ da matéria seca. Aproximadamente, nesse caso, o tratamento controle, não tratado com NaCl apresentou valores constantes dos níveis de Na em função da variação da temperatura, qual seja $300 \text{ mmol Na}^+ \text{ kg}^{-1}$ de matéria seca. Sendo assim, as plantas de feijão tratadas com NaCl apresentam acúmulo de sais nas raízes quando ocorre aumento da temperatura, reduzindo a matéria seca total.

2.5 Fotossíntese e fluorescência da clorofila

A fotossíntese é o processo fundamental para a produção das culturas. Em média, 90% da matéria seca de um vegetal resultam diretamente do processo fotossintético. Tanto absorção quanto o uso da energia luminosa, podem ser estimados em função da fluorescência da clorofila, indicando, de acordo com Baker e Rosenqvist (2004) alterações na atividade fotossintética. Dessa maneira, medidas da fluorescência identificam, rapidamente e de forma não invasiva, o quanto eficiente está o transporte de elétrons no fotossistema II (PSII) e pelo fato dessa eficiência estar relacionada à assimilação de CO₂ tem conduzido os pesquisadores a utilizarem parâmetros de fluorescência da clorofila, visando avaliar o desempenho de plantas em condições controladas, de campo e em laboratório. É citada nas revisões de Baker (2008), a correlação entre os níveis de fluorescência e alterações na assimilação de moléculas de CO₂; sendo assim, em algumas circunstâncias a fluorescência pode ser correlacionada às taxas de fotossíntese; e que, medidas da fluorescência são uma poderosa ferramenta para avaliar o desempenho fotossintético das plantas e pode ser potencializado quando associado a medidas de trocas gasosas e temperatura foliar.

Avaliando a eficiência fotoquímica de três cultivares de feijão, submetidas a diferentes níveis de temperatura (25, 30, 35, 40, 45 e 48°C) por 1,5 horas 13 dias após a germinação, Costa et al. (2002) concluíram que, a temperatura de 45°C aumentou a fluorescência inicial com decréscimo a 48°C, nas três cultivares avaliadas. Para as cultivares Carioca e Negro Huasteco houve queda no valor da fluorescência máxima; fato este, não observado para a cultivar Epace 10. Os baixos valores registrados para a fluorescência máxima expressam perda de atividade do (PSII) precedido pela morte das cultivares Carioca e Negro Huasteco e não para Epace 10, indicando uma possível sensibilidade das duas primeiras cultivares à alta temperatura e maior tolerância para última. A dissimilaridade de resultados foi marcante também na medida da eficiência da fotossíntese demonstrando resultados nulos a 48°C para as cultivares Carioca e Negro Huasteco e ausência de alteração na cultivar Epace 10, que não apresentou danos ao PSII em resposta aos tratamentos.

Pesquisando os efeitos do estresse hídrico sobre a fotossíntese Dias et al. (2010), submeteu plantas de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) com 21 dias de idade ao estresse hídrico, três dias após a imposição do estresse foi observado redução na assimilação de CO₂ que passou; em média, de 11 para 7 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; considerando a condutância estomática os valores variaram de 0,35 para 0,15 $\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ acompanhados, também, da redução da fluorescência para os tratamentos sem estresse e com estresse, respectivamente.

Ninou et al. (2012) observaram que a assimilação de CO_2 variou de 12,7 para $6,8 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e a condutância estomática de 0,53 para $0,18 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ quando plantas de feijão, irrigadas e cultivadas em condição de campo, foram submetidas ao estresse hídrico; nessa ocasião, as lâminas de irrigação foram baseadas em 100 e 25% da evapotranspiração de referência, respectivamente. Em estudo conduzido por Thameur et al. (2012), com plantas de cevada oriundas de duas localidades distintas, Tlalit e Switir, porção meridional da Tunísia, relataram diferenças na assimilação de CO_2 e na condutância estomática das cultivares, quando variada a oferta de água para o crescimento dessa cultura; assim foi observado que, as cultivares procedentes da região de Tlalit foram mais tolerantes às condições de baixa disponibilidade hídrica, ou seja, crescidos com umidade do solo correspondente a 50% da capacidade de campo. Como estratégia adaptativa, essa linhagem, reduziu a taxa de assimilação do CO_2 , principalmente pelo maior controle dos estômatos e ajustes nos padrões de trocas gasosas, além disso, esses processos fisiológicos foram acompanhados de modificações morfológicas das folhas, redução do limbo foliar; em consequência disso, a água disponível foi utilizada de forma mais eficiente, corroborando com uma estratégia mais elaborada de adaptação das cultivares oriundas de Tlalit, às condições de estresse hídrico.

A avaliação dos parâmetros fisiológicos podem agregar avaliações quantitativas e qualitativas, expressando informações precisas que descrevam a condição que se encontra todo aparato fotossintético da planta, informações essas, capazes de direcionar os pesquisadores na escolha de cultivares de forma mais assertiva, principalmente, sobre a ótica do estresse abiótico.

2.6 Efeito da temperatura sobre o desenvolvimento das plantas

Alteração da temperatura, nas esferas globais e locais sempre tem sido relacionada ao desenvolvimento das plantas visando conhecer os impactos desses efeitos sobre a fisiologia vegetal, permitindo ao longo dos anos definir com propriedade os melhores locais para o desenvolvimento das culturas com o intuito de produzir alimentos em maior escala. De acordo com Luo (2011) a temperatura é um dos maiores fatores ambientais que mais afeta as taxas de crescimento, desenvolvimento e o rendimento das culturas; além disso, considerando a fenologia do crescimento vegetal temperaturas específicas são exigidas em função dos estádios que a planta se encontra sendo prejudiciais, em níveis elevados ou não, principalmente na pré e pós antese e enchimento de grãos.

Nesse sentido, Huve et al. (2011) conduziram pesquisa com plantas de feijão (*Phaseolus vulgaris*) considerando alterações progressivas da temperatura foliar e seus efeitos sobre a cinética da fotossíntese e os eventuais danos celulares. Os resultados apresentaram queda acentuada nas taxas de fotossíntese líquida e da fluorescência máxima; concomitantemente, a elevação da respiração noturna e da fluorescência inicial quando as temperaturas alcançaram um limiar superior a 38 e 40°C, respectivamente. Os valores de fotossíntese líquida variaram de 13,2 para 11,8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente; tendendo a zero com o incremento da temperatura. A fluorescência máxima variou de 0,43 para 0,38 demonstrando valores menores que este, na medida em que os danos foliares tornaram-se mais efetivos sobre as células. Em contrapartida, a respiração e a fluorescência inicial, apresentar incrementos de 1,1 a 1,25 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e de 0,20 0,30 crescente e sucessivamente, na medida em que, foram impostas maiores temperaturas às folhas; acima de 40°C. Sabendo-se que os autores avaliaram a propagação das lesões celulares na medida em que o estresse térmico era acentuado, os dados foram conclusivos em definir os efeitos da temperatura sobre o aparato fisiológico em plantas de feijão e o limiar que as plantas, nas condições experimentais, foram capazes de suportar; ou até mesmo, recuperar frente a gravidade dos danos celulares gerados pelo aquecimento supraótimo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área experimental

A pesquisa foi conduzida em casa de vegetação tipo arco, de dimensões de 6,4 m de largura por 22,5 m de comprimento, totalizando 144 m² localizada na área experimental do IAPAR, em Londrina, PR, localizada nas coordenadas geográficas 23°23'S e 51°11'W e altitude de 585 m, durante o período de janeiro a setembro de 2013. A estrutura é revestida por policarbonato tratado contra ação de raios ultravioleta, lateralmente; a cobertura composta de filme plástico de baixa densidade. O sistema de renovação interna do ar é automático e regulado para manter a temperatura em 25°C durante a condução do experimento, aquecendo ou resfriando o ambiente.

Figura 1 - Casa de vegetação utilizada para experimentação

3.2 Caracterização física e química do substrato

As características físicas e químicas do substrato (Tabela 1) foram determinadas seguindo as recomendações da Embrapa (1997) e Raij (2001). O preparo do substrato consistiu inicialmente no peneiramento de todos componentes a serem utilizados em malha de 10 mm, a fração de solo utilizado para composição do substrato foi classificado segundo Embrapa (2013) como Latossolo Vermelho distroférrico ao qual foi incorporado calcário dolomítico (PRNT = 91%) ajustando o valor de V para 70%. Em seguida, foi adicionado a 180 L de solo, 60 L de areia, 60 L de matéria orgânica (esterco de gado curtido) e 1 kg de fertilizante químico, NPK de formulação 04-30-10. Todos componentes foram misturados e transferidos para os recipientes. Depois, as parcelas experimentais foram irrigadas até próximo à capacidade de vaso deixando incubar os fertilizantes por um período de 30 dias. Na semeadura, foram aplicados uma solução

de 3 mg dm⁻³ de Zn (sulfato de zinco) e 50 mg dm⁻³ de N (uréia) e aos 30 dias após a emergência das plantas 0,3 g de N (sulfato de amônio) por parcela (POLANÍA et al., 2001).

Tabela 1 - Características físico e química do substrato utilizado no experimento

Análise Química											
P	C	pH	Al	H + Al	Ca	Mg	K	SB	T	V	SAl
(mg dm ⁻³)	(mg dm ⁻³)	-----	-----	cmol _c dm ⁻³ substrato	-----	-----	-----	-----	-----	---- %	---
496,9	14,45	5,40	0,00	5,34	4,05	1,97	2,35	8,37	13,71	61,05	0,00
Análise Física (%)											
Areia	Silte	Argila		Densidade (g cm ⁻³)							
46	9	45		1,70							

SB: Soma de Bases; T: Capacidade de Troca de Cátions; V: Saturação por Bases; SAl: Saturação por Alumínio; P – K: Mehlich I; Ca – Mg – Al: KCl M; pH: CaCl₂ 0,01 M; C: Walkley – Black

3.3 Controle fitossanitário

Para o controle preventivo da antracnose (*Colletotrichum lindemuthianum*) e podridão radicular (*Rhizoctonia solani*) foi aplicado, no tratamento das sementes, o fungicida Thiram na dose de 150 mL 100 kg⁻¹ sementes. Durante o desenvolvimento das plantas foram realizadas 12 pulverizações, sintetizadas na Tabela 2:

Tabela 2 - Produtos fitossanitários aplicados na cultura do feijão durante o período experimental

Dias após emergência	Produto (Ingrediente ativo)	Classe do produto	Dose
6	Tiamethoxan	Inseticida	1,5**
13	Tiamethoxan	Inseticida	1,5**
16	Hidróxido de fentina	Fungicida	1,5**
24	Abamectina	Acaricida	2,0**
26	Tiamethoxan	Inseticida	2,0*
30	Tiofanato metílico + Clorotalonil	Fungicida	2,0*
42	Hidróxido de fentina	Fungicida	1,5**
44	Abamectina + Tiamethoxan	Acaricida/Inseticida	2,0** e 2,0*
51	Hidróxido de fentina	Fungicida	1,5**
58	Hidróxido de fentina + Tiamethoxan	Fungicida/Inseticida	2,0**
63	Tiofanato metílico + Clorotalonil	Fungicida	2,0*

* Dose em g L⁻¹ ; **Dose em mL L⁻¹

3.4 Caracterização hídrica do substrato

A curva de retenção de água no substrato foi elaborada seguindo metodologia descrita em Silva (2010) utilizando cinco recipientes de PVC com capacidade para acondicionar um volume de 10 dm³ de substrato, sendo este, idêntico ao utilizado no experimento. Na base dos recipientes foram feitos pequenos orifícios, de forma a possibilitar a drenagem do excesso de água e secagem do substrato; depois foram todos preenchidos com uma camada 0,02 m de pedra brita nº1, manta geotêxtil (BIDIM OP – 30), tensiômetro e substrato, nessa sequência. A acomodação das frações de substrato foi realizada naturalmente, quando da saturação por ascensão capilar (Figura 2).

Figura 2 - Caracterização hídrica do solo: (A) Determinação do peso seco, (B) Recipientes sendo saturados por ascensão capilar, (C) Recipientes saturados com a porção superior fechada para evitar perda de água por evaporação

O monitoramento do potencial de água no sistema foi realizado por meio de um tensiômetro de punção instalado em cada recipiente a 0,15 m de profundidade, por um período de 70 dias. Depois da saturação, todos recipientes permaneceram em bancada até cessar a drenagem da água; em seguida foram encaminhados para casa de vegetação sendo aferidos a massa de solo e os valores de tensão, concomitantemente ao processo de secagem dos recipientes ao longo do tempo. Ao final da aquisição de dados as informações foram organizadas em planilha eletrônica e ajustadas resultando em um modelo matemático fundamentado na relação entre tensão de água e a umidade do substrato, auxiliares no manejo da irrigação.

3.5 Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos foram definidos por três níveis de disponibilidade hídrica no substrato (θ) baseado em Barbosa et al. (2012), monitorados com tensiômetros instalados nas profundidades de 0,15; 0,20; e 0,30 m, aplicados em três cultivares de feijão (IAPAR 81, IPR Tangará e IPR Curió) em delineamento experimental de blocos casualizados, arranjados em esquema fatorial 3 x 3, com cinco repetições, totalizando 45 parcelas, assim definidos:

I₁₅: Irrigação quando a tensão média foi igual a 30 kPa a 0,15 m de profundidade;

I₂₀: Irrigação quando a tensão média foi igual 30 kPa a 0,20 m de profundidade;

I₃₀: Irrigação quando a tensão média foi igual 30 kPa a 0,30 m de profundidade.

Cada parcela experimental foi constituída por cinco anéis de PVC de 300 mm de diâmetro e 0,20 m de altura; sobrepostos e unidos com fita adesiva, compondo um recipiente

único de 1 m de altura preenchido com 70 dm³ de substrato, física e quimicamente caracterizados na Tabela 1. A seguimentação do recipiente, em cinco partes, permitiu avaliar o crescimento radicular em profundidade, a cada 0,20 m. A irrigação foi realizada quando os tensiômetros instalados apresentaram tensão média de 30 kPa, sendo esse valor elevado para a capacidade de vaso, igual a 5,0 kPa, esse procedimento foi repetido sempre que a tensão do substrato retornasse as condições de contorno estabelecidas.

As cultivares utilizadas no experimento apresentam as seguintes características:

IAPAR 81: Apresenta ciclo médio da emergência à maturação de colheita de 92 dias, potencial produtivo de 2.163 kg ha⁻¹ e boa tolerância a altas temperaturas;

IPR Tangará: Apresenta ciclo médio da emergência à maturação de colheita de 87 dias, potencial produtivo de 3.326 kg ha⁻¹ e tolerância moderada altas temperaturas;

IPR Curió: O ciclo médio da emergência até a maturação de colheita é de 70 dias sendo classificada como cultivar precoce e potencial produtivo de 3.982 kg ha⁻¹.

Todas cultivares utilizadas foram desenvolvidas pelo Instituto Agrônomo do Paraná, pertencem ao grupo carioca e apresentam porte ereto o que possibilita colheita mecanizada.

3.6 Instalação e montagem do experimento

Após o preparo do substrato o mesmo foi disposto no interior dos recipientes sobre uma camada de pedra brita de 0,03 m de altura seguido por uma manta de tecido Bidim. A irrigação inicial ocorreu em todas as parcelas até valores próximos à capacidade de vaso; tensão de 5,0 kPa. Posteriormente, as parcelas foram organizadas no interior da casa de vegetação, segundo o delineamento estatístico proposto, precedido da semeadura das cultivares (Figura 3).

Figura 3 - Instalação do experimento: (A) Detalhe da parcela experimental e das cinco subdivisões, (B) Vista parcial do ensaio, (C) Detalhe do tensiômetro instalado na parcela

3.7 Manejo da irrigação

O sistema de irrigação utilizado foi o gotejamento, por meio de emissores autocompensante com pressão de serviço de 10 mca e vazão nominal de 7,5 L h⁻¹. Os gotejadores foram acoplados às linhas de irrigação (tubos de polietileno de 16 mm), das quais as derivações foram direcionadas para as parcelas, por meio de microtubos, totalizando quatro pontos de emissão por parcela (Figura 4). Para garantir o suprimento de água adequado em todas as parcelas experimentais e suporte aos cálculos de lâmina bruta e tempo de irrigação, foi realizada avaliação da uniformidade de emissão de água pelo sistema de irrigação de acordo com a eq. (1) descrita em (FAVETTA & BOTREL 2001).

$$UE = 100(1 - 1,27 \times e^{-0,5} \times CV_f) \frac{q_n}{\bar{q}} \quad (1)$$

em que:

UE - Uniformidade de emissão %;

e - Número de emissores por planta;

CV_f - Coeficiente de variação de fabricação igual a 0,155;

q_n - Média das 25% menores vazões, (L h⁻¹);

$\bar{q}$ - média das vazões, (L h⁻¹) unidades.

Figura 4 - Sistema de irrigação: (A) Vista parcial do sistema de irrigação, (B) Detalhe do posicionamento dos pontos de emissão de água e tensiômetro, (C) Leitura do tensiômetro e posicionamento da planta na parcela experimental

A umidade do solo foi monitorada diariamente por tensiômetros de punção com leituras realizadas no início da manhã. A reposição de água nas parcelas fundamentou-se nos resultados de umidade e na curva de retenção de água no substrato variando as lâminas de irrigação quando pertinente a cada tratamento, eq. (2 a 4) conforme descrito em (SANTANA et al., 2009).

$$LL = (\theta_{cc} - \theta_{atual}) \times p_i \quad (2)$$

$$LB = \frac{LL}{E_a \times UE} \quad (3)$$

$$T = \frac{LB_{média} \times A}{e \times q_a} \quad (4)$$

em que:

LL - Lâmina líquida de irrigação (mm);

θ_{cc} - Umidade na capacidade de vaso ($0,51 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$);

θ_{atual} - Umidade no momento de irrigar ($0,42 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$);

p_i - Profundidade de instalação do sensor de umidade (mm);

LB - Lâmina bruta de irrigação (mm);

E_a - Eficiência de aplicação de água do sistema de irrigação (0,95);

UE - Uniformidade de emissão (0,9995);

$LB_{média}$ - Lâmina média das leituras dos sensores instalados nas diferentes profundidades (mm);

T - Tempo de funcionamento do sistema de irrigação em cada tratamento (h);

A - Área ocupada por planta ($0,07 \text{ m}^2$);

e - Número de emissores por planta (1);

q_a - Vazão média dos emissores ($7,5 \text{ L h}^{-1}$).

3.8 Avaliações

3.8.1 Aspectos produtivos

Todas as plantas foram cortadas na altura correspondente à superfície do solo e separadas em folha, caule, vagens e grãos encaminhados para secagem em estufa de circulação forçada de ar a 60°C até peso constante representando a matéria seca de cada parte e total. Cabe ressaltar que a colheita dos grãos e o peso foram corrigidos para umidade de 13%, para cada tratamento e material genético (SIMSEK et al., 2012). O índice de colheita foi determinado pela relação entre a produção de grãos e a fitomassa total da parte aérea de cada parcela (BUILES et al., 2011).

O sistema radicular foi avaliado a cada 0,20 m de profundidade até o máximo de 1,0 m. As avaliações ocorreram aos 92 dias para as cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará e aos 77 dias para IPR Curió, devido à precocidade da cultivar. Esse procedimento consistiu, inicialmente, no corte dos seguimentos de cada parcela utilizando fio de aço, em seguida, todo volume de substrato foi peneirado por duas vezes em malha de 3,0 mm e uma vez em malha de 2,0 mm. Após o processamento, o substrato restante nas peneiras foi depositado em caixas de madeira sendo retirado as raízes restantes de menor tamanho e diâmetro, por meio de movimentos circulares. Posteriormente, as raízes foram adicionadas aos seus respectivos tratamentos, lavados e acondicionado em sacos de papel devidamente identificados, sendo assim secos em estufa de circulação forçada de ar a 60°C, até peso constante.

3.8.2 Aspectos fisiológicos

As medidas relacionadas à assimilação líquida de CO₂ (A), condutância estomática (g_s) e transpiração (E), foram realizadas com analisador de gases por infravermelho (ADC Biosciense®) utilizando densidade de fluxo de fótons igual a 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, entre 10:00 – 11:30 h. (PIMENTEL et al., 2011; NINOU et al., 2012). Paralelamente, foi avaliada a fluorescência máxima do fotossistema II (F_m), e a eficiência do fotossistema II (F_m/F_v) utilizando-se de um fluorômetro modulado MINI-PAM (Walz, Germany). A fluorescência inicial (F₀) foi obtida a uma saturação luminosa baixa (<0,1 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); em contrapartida, a máxima fluorescência, foi determinada com um pulso de fótons saturante de 4.000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ durante 0,3 s ajustado para frequência de 600 Hz. Estes dois parâmetros básicos são fundamentais para calcular a variação da fluorescência (F_v), (COSTA et al., 2002). De acordo com o explícito, foi calculada a eficiência fotoquímica do PSII de acordo com a eq.(5).

$$PSII = \frac{F_v}{F_{max}} \quad (5)$$

em que:

PSII – Eficiência fotoquímica máxima do fotossistema II;

F_v – Variação da fluorescência;

F_{max} – Fluorescência máxima.

A amostragem considerou folhas jovens completamente desenvolvidas expostas ao sol em número de quatro repetições por tratamento no momento precedente às irrigações. Para avaliação da fluorescência foi necessário que as plantas estivessem adaptadas ao escuro sendo assim realizadas antes do amanhecer. Todas as avaliações fisiológicas iniciaram 20 Dias Após a Semeadura (DAS) e ocorreram ao longo do ciclo da cultura aos 20, 35, 47, 62, 72 e 82 (DAS). De forma complementar, foi determinada a eficiência no uso da água intrínseca e instantânea (WUE) segundo as eq. (6) e eq. (7) relacionadas nos estudos de (THAMEUR et al., 2012).

$$WUE_{intrínseca} = \frac{A}{g_s} \quad (6)$$

$$WUE_{instantânea} = \frac{A}{E} \quad (7)$$

em que:

WUE – Eficiência no uso da água ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$);

A – Assimilação líquida de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$);

g_s – Condutância estomática ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$);

E – Taxa de transpiração ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

3.9 Análise estatística

Com a finalidade de realizar a análise de variância; inicialmente, foi verificado se as suposições estatísticas foram satisfeitas para que os efeitos principais fossem aditivos, erros independentes e distribuídos normalmente, com variâncias homogêneas. As características avaliadas foram submetidas ao teste de Barlett, e analisadas estatisticamente por meio da análise de variância desdobrando-as sempre que a interação foi significativa com base no teste

de Tukey a 5% de probabilidade. O software utilizado para as análises foi o ASSISTAT versão 7.7 Beta (SILVA, 2013).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Monitoramento da temperatura e irrigação

O conhecimento das condições ambientais foi necessário para identificar se o controle local era satisfatório para atender as necessidades da pesquisa, a Figura 5 representa as variações da temperatura máxima, mínima e média no interior da casa de vegetação que registrou ao longo da experimentação valores médios de 27, 18 e 23°C, respectivamente. A Figura 6 representa a curva de retenção de água no substrato segundo metodologia de Silva (2010), leituras acima de -75 kPa tornaram-se pouco precisas por estarem na faixa limítrofe de operação pelo tensiômetro e da capacidade de extração das plantas de feijão.

Figura 5 - Temperatura máxima, mínima e média registrada no interior da casa de vegetação durante a condução do experimento

Figura 6 - Curva de retenção da água no substrato

Os resultados relativos à vazão dos emissores utilizados para a experimentação e o valor médio da vazão em $L\ h^{-1}$ (Figura 7) serviram de referência para calcular a uniformidade de aplicação de água pelo sistema de irrigação conforme equação proposta por (FAVETTA & BOTREL, 2001). Esta avaliação classificou a uniformidade de aplicação de água como excelente equivalente a 99,95%. Na Figura 8 são apresentados os resultados da frequência acumulada em função das vazões observadas em $L\ h^{-1}$, os valores observados estão próximos à distribuição normal acumulada e segundo as normas estabelecidas pela ASABE (2008), 100% dos valores estão compreendidos no intervalo de 7,73 a 7,14 segundo a expressão $(\bar{q} \pm 3 \cdot Sq)$ que considera a vazão média dos emissores ($\bar{q}$) e o desvio padrão das vazões observadas (Sq), conferindo grau de excelência aos emissores utilizados.

Figura 7 - Vazão obtida pela avaliação de 48 emissores utilizados para irrigação das parcelas experimentais

Figura 8 - Frequência acumulada e valores observados das vazões em $L\ h^{-1}$ em comparação à distribuição normal acumulada dos emissores utilizados no experimento

A Figura 9 representa as informações obtidas por meio da leitura média dos tensiômetros instalados em cada parcela experimental em diferentes profundidades, convertidos em umidade base volume ao longo de todo o ciclo de desenvolvimento das plantas de feijão. Até os 20 Dias Após Semeadura (DAS) a umidade do substrato foi mantida próxima à capacidade de vaso; é perceptível o declínio da umidade em todos gráficos (A, B, C e D), representando a supressão da irrigação para obtenção dos tratamentos. A ascensão dos valores representa irrigação em regimes diferenciados, retornando a umidade para valores próximos à capacidade de vaso, equivalente a $0,51 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Ao final do ciclo de produção, as cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará com tensiômetro instalados a 0,15; 0,20 e 0,30 m de profundidade receberam 347; 463 e 547 mm de água, a cultivar IPR Curió, devido à precocidade apresentada pelo material, os volumes de irrigação foram menores e iguais a 256; 329 e 404 mm (Figura 10).

Figura 9 - Resultados da umidade no substrato: (A) Tensiômetro a 0,15 m de profundidade; (B) tensiômetro a 0,20 m de profundidade; (C) tensiômetro a 0,30 m de profundidade; (D) Agrupamento de todos os resultados e perfil de umidade na capacidade de vaso e a tensão de 30 kPa

Figura 10 - Irrigação total aplicada (mm) de acordo com os tratamentos propostos para as três cultivares de feijão

4.2 Aspectos produtivos

Na Tabela 3 são apresentados os resultados do teste F para os aspectos produtivos avaliados: Fitomassa seca da folha (FSF), Fitomassa seca do caule (FSC), Fitomassa seca do legume (FSL), Fitomassa seca da parte aérea (FSPA), Fitomassa seca total da raiz (FSTR), Fitomassa seca total da planta (FSTP), Rendimento de grãos (RG) e Índice de colheita (IC). Na Tabela 4 são apresentados os resultados do teste F para Fitomassa seca da raiz (FSR) em diferentes profundidades.

Tabela 3 - Resultados do teste F para Fitomassa Seca de Folhas, caule, legume, parte aérea, raízes, total da planta, rendimento de grãos e índice de colheita para três cultivares de feijão submetida a níveis de disponibilidade hídrica no solo

Fator de Variação	Cultivar	Profundidade do Tensiômetro	Interação	C.V. (%)
Fitomassa seca da folha	64,17**	15,44**	3,84**	10,50
Fitomassa seca do caule	51,50**	7,77**	1,32 ^{n.s.}	10,33
Fitomassa seca do legume	53,84**	8,03**	1,21 ^{n.s.}	14,35
Fitomassa seca da parte aérea	82,32**	22,92**	3,46*	9,01
Fitomassa seca total da raiz	40,50**	3,05 ^{n.s.}	0,43 ^{n.s.}	19,77
Fitomassa seca total da planta	78,75**	20,93**	3,13*	9,34
Rendimento grãos	70,66**	38,02**	5,69**	9,34
Índice de colheita	0,75**	14,32**	3,11*	5,20

* Significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade e ^{n.s.} não significativo

Tabela 4 - Resultados do teste F para Fitomassa seca da raiz até a profundidade de 1,00 m para três cultivares de feijão submetida a níveis de disponibilidade hídrica

Fator de Variação	Cultivar	Profundidade do Tensiômetro	Interação	C.V. (%)
Fitomassa seca de raiz	0 – 0,20			
	31,66 **	2,07 ^{n.s.}	0,78 ^{n.s.}	18,83
	0,20 – 0,40			
	24,03 **	3,42 *	0,72 ^{n.s.}	24,65
	0,40 – 0,60			
	29,47 **	2,36 ^{n.s.}	0,85 ^{n.s.}	24,18
	0,60 – 0,80			
	14,19 **	0,90 ^{n.s.}	0,26 ^{n.s.}	34,93
	0,80 – 1,00			
	24,21 **	3,62 ^{n.s.}	0,17 ^{n.s.}	43,29
Total				
	40,50 **	3,05 ^{n.s.}	0,43 ^{n.s.}	19,77

* Significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade e ^{n.s.} não significativo

Na Tabela 5 são apresentados os resultados médios após o desdobramento estatístico. Os resultados indicam diferença estatística em função das cultivares e dos níveis de disponibilidade hídrica no substrato.

Tabela 5 - Resultados médios para FSF, FSC, FSL, FSPA, FSTR, FSTP, RG e IC para três cultivares de feijão submetida a níveis de disponibilidade hídrica

Cultivar	Profundidade do Tensiômetro (m)		
	0,15	0,20	0,30
FSF - Fitomassa Seca Folhas (g)			
IAPAR 81	46,58 aB	55,34 aA	55,73 bA
IPR Tangará	48,56 aB	55,78 aB	67,52 aA
IPR Curió	36,04 bA	35,69 bA	39,20 cA
FSC - Fitomassa Seca do Caule (g)			
IAPAR 81	39,83 aA	44,91 aA	43,98 bA
IPR Tangará	40,43 aB	45,21 aAB	50,45 aA
IPR Curió	29,50 bA	31,01 bA	32,84 cA
FSL - Fitomassa Seca de Legume (g)			
IAPAR 81	29,98 aA	34,91 aA	31,30 aA
IPR Tangará	24,44 aB	31,26 aA	32,45 aA
IPR Curió	15,79 bA	19,26 bA	20,17 bA
FSPA - Fitomassa Seca da Parte Aérea (g)			
IAPAR 81	195,62aB	243,82aA	217,84bAB
IPR Tangará	187,80aB	234,51aA	250,60aA
IPR Curió	133,28bB	150,61bAB	164,76cA
FSTP - Fitomassa Seca Total da Planta (g)			
IAPAR 81	201,79 aB	251,31 aA	224,97 bAB
IPR Tangará	194,01 aB	240,58 aA	257,34 aA
IPR Curió	136,41 bB	153,85 bAB	169,12 cA
RG - Rendimento de Grãos por Planta (g)			
IAPAR 81	79,23 aB	108,66 aA	86,83 bB
IPR Tangará	74,36 aB	102,26 aA	100,18 aA
IPR Curió	51,95 bB	64,64 bA	72,55 cA
IC - Índice de Colheita			
IAPAR 81	0,39 aB	0,43 aA	0,39 bB
IPR Tangará	0,38 aB	0,42 aA	0,39 bB
IPR Curió	0,38 aB	0,42 aA	0,43 aA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

4.2.1 Fitomassa seca de folhas (FSF)

A Fitomassa seca de folhas (FSF) apresentada nas Tabelas 3 e 5 demonstra que houve diferença estatística em relação às cultivares e da disponibilidade hídrica. Para a cultivar IAPAR 81 a diferença foi de 16,42% comparando o tensiômetro a 0,15 e 0,30 m, em relação ao tratamento 0,20 e 0,30 m não foram observadas diferenças significativas. A cultivar IPR Tangará apresentou diferenças entre os tratamentos 0,20 e 0,30 m; este último superior em 17,39%; ou seja na medida em que aumentou-se a disponibilidade de água em camadas mais profundas do substrato houve incremento na FSF. Considerando a cultivar IPR Curió não foram observadas diferenças significativas em relação aos tratamentos, esta cultivar apresentou valor médio de FSF igual a 36,99 g.

Contudo, pode-se observar que a cultivar IAPAR 81 não apresentou incrementos significativos na FSF quando a disponibilidade de água total variou de 463 para 547 mm indicando que uma menor disponibilidade hídrica pode ser recomendada sem comprometimento dessa característica. Caso contrário, foi observado para a cultivar IPR Tangará, esta apresentou aumento na FSF quando a disponibilidade hídrica variou na mesma quantidade citada anteriormente apresentando incremento de 17,39%, respeitando esta condição, pode-se inferir que tal cultivar apresenta maior dependência da disponibilidade hídrica para manutenção das características produtivas.

A cultivar IPR Curió, ao manter-se sem incremento significativo no valor de FSF pode ser considerada, como a cultivar que melhor adaptou-se à condição de deficiência hídrica podendo manter a mesma produção de FSF com disponibilidade hídrica total variáveis de 256 a 404 mm. Larcher (2000) salienta que diferenças na FSF podem ocorrer devido ao acúmulo e partição de fitomassa seca em plantas de feijão condicionadas à disponibilidade de água no solo. No estudo conduzido por Oliveira et al. (2008) a FSF foi reduzida quando as plantas de feijão foram submetidas a disponibilidade hídrica relativa a 20% do Volume Total de Poros (VTP) no solo durante início da floração até o enchimento de grãos, naquela ocasião a FSF não alcançou 1,0 g; em contrapartida, com umidade do solo mantida a 60% do VTP, proporcionou FSF sete vezes maior. Nesse sentido, os resultados aqui apresentados por serem muito superiores garantem que os processos de melhoramento genético pelos quais as cultivares utilizadas foram submetidos possibilitam produção, mesmo em condições de maior restrição hídrica, destaque para as cultivares IAPAR 81 e IPR Curió.

4.2.2 Fitomassa seca de caule (FSC)

A Fitomassa seca de caule (FSC) não apresentou diferença significativa para a cultivar IAPAR 81 em relação aos tratamentos (Tabela 5), resultando em valor médio de 42,91 g. Por outro lado a cultivar IPR Tangará mostrou-se mais sensível aos tratamentos, demonstrando incremento de valores com disponibilidade hídrica total de 547 mm, superando o tratamento cuja disponibilidade hídrica total foi de 347 mm, em 15,12%. Essa mesma característica não foi estatisticamente distinta para a cultivar IPR Curió que apresentou média de 31,12 g independente da disponibilidade hídrica, nesse caso igual a 256, 329 e 404 mm.

Comparativamente, as cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará apresentaram rendimentos da FSC semelhantes nos tratamentos 0,15 e 0,20 m. A diferença estatística foi expressa no tratamento 0,30 m com produção 14,71% superior para IPR Tangará. Observou-se diferença estatística para a cultivar IPR Curió em relação as outras duas cultivares, nessa ocasião, os valores de FSC foram menores, em 29,49%.

4.2.3 Fitomassa seca de legume (FSL)

A característica Fitomassa seca de legume (FSL) identifica genótipos que não possuem boa tolerância às condições de menor disponibilidade hídrica (MOLINA et al., 2001). Pode-se observar com as informações contidas na Tabela 5, que a cultivar IPR Tangará foi a única a apresentar diferença estatística entre os tratamentos sendo esta, em torno de 24,68%, considerando o tensiômetro a 0,15 e 0,30 m; cabe ressaltar que para o tratamento 0,20 m não houve diferença estatística em comparação com tensiômetro a 0,30 m. O contrário foi observado comparando as duas cultivares com IPR Curió.

Foram observadas diferenças estatísticas entre as cultivares com menores valores para IPR Curió em comparação as demais. Da mesma forma que o observado para a cultivar IAPAR 81 a IPR Curió não sofreu influência do monitoramento da irrigação nas diferentes profundidades, não obstante esta apresentou menores valores de FSL em comparação com IAPAR 81 e IPR Tangará.

Segundo Do Vale et al. (2012), genótipos que se sobressaem em avaliações de FSL geralmente possuem capacidade de tolerar melhor períodos de supressão hídrica. Deste modo, a planta mantém um status hídrico suficiente para manutenção dos aspectos produtivos mesmo em condições de supressão da irrigação. Nesse contexto, os resultados apresentados podem identificar as cultivares IAPAR 81 e IPR Curió como cultivares, possivelmente mais tolerantes

à deficiência de água no solo em comparação à cultivar IPR Tangará; este último em função dos resultados obtidos, pode comprometer a produção de FSL em até 23,28%, quando submetido a uma menor disponibilidade hídrica.

4.2.4 Fitomassa seca da parte aérea (FSPA)

A Fitomassa seca da parte aérea (FSPA) apresentou maiores valores para a cultivar IPR Tangará nos tratamentos com tensiômetro a 0,20 e 0,30 m de profundidade, que foram em média iguais a 234,51 e 250,60 g respectivamente, estes sem diferença significativa (Tabela 5). No tratamento com tensiômetro a 0,15 m o resultado foi 22,57% menor. Valores intermediários para essa característica foram obtidos para cultivar IAPAR 81, que apresentou tendência de maior rendimento de FSPA, no tratamento com tensiômetro posicionado a 0,20 m; seguido dos tratamentos de 0,15 e 0,30 m, estes dois últimos não apresentaram diferença significativa. Os valores médios foram de 243,82; 195,62 e 217,84 g, respectivamente.

A cultivar IPR Curió apresentou menores resultados de FSPA dentre as cultivares estudadas. Esses valores foram crescentes na medida em que se aumentou a profundidade de monitoramento da água no substrato, nessa condição, os resultados obtidos com tensiômetro a 0,15 e 0,20 m não diferiram entre si estatisticamente; enquanto que a 0,30 m os valores foram estatisticamente superiores ao de 0,15 m em 19,12 %. Nesse caso, para as profundidades de 0,15; 0,20 e 0,30 m as medias foram iguais a 133,28; 150,61 e 164,76 g; respectivamente.

Pode-se inferir que a cultivar IPR Tangará assume tendência de resposta linear à produção de FSPA com monitoramento da irrigação em maior profundidade, diferentemente a cultivar IAPAR 81 que apresenta tendência ao máximo rendimento com monitoramento da irrigação na profundidade intermediária e disponibilidade hídrica total de 463 mm. Semelhantemente à cultivar IPR Tangará, porém com menor rendimento de fitomassa, a cultivar IPR Curió apresentou incremento, para essa característica, quando foram crescentes a disponibilidade de água às cultivares.

4.2.5 Fitomassa seca total da planta (FSTP)

A Fitomassa seca total da planta (FSTP), resultado da soma da massa de grãos, legume, caule, folhas e raízes apresentada na Tabela 5, demonstra que a cultivar IAPAR 81 não apresentou diferença estatística com tensiômetro posicionado a 0,20 e 0,30 m; mas comparando o tratamento a 0,20 com 0,15 m houve diferença estatística entre ambos. Nesse sentido, com

disponibilidade hídrica total de 463 mm houve maiores rendimentos da FSTP em comparação ao tratamento a 0,15 m, quando a disponibilidade hídrica total equivalente a 347 mm; nesse caso, o incremento foi de 19,70%.

A cultivar IPR Tangará não diferiu estatisticamente com tensiômetro a 0,20 e 0,30 m. Os resultados de FSTP foram maiores para esses dois tratamentos que em comparação com 0,15 m foram, em média, superiores em 21,35%. Da mesma forma para cultivar IPR Curió as diferenças significativas também foram observadas entre os dois maiores níveis de disponibilidade hídrica, 329 e 404 mm, ou seja, para os tratamentos 0,20 e 0,30 m; respectivamente, se comparado ao tratamento com menor disponibilidade hídrica total, equivalente a 256 mm e tensiômetro a 0,15 m de profundidade.

Avaliando as diferenças entre as cultivares fica evidente que a cultivar IPR Tangará apresentou maiores rendimentos com tensiômetro a 0,30 m em comparação com as demais. Porém, os outros tratamentos 0,15 e 0,20 m a única diferença significativa ficou comprovada entre as cultivares IAPAR 81, IPR Tangará em comparação à cultivar IPR Curió.

Esses resultados corroboram com as avaliações de Oliveira et al. (2008) onde a cultivar Capixaba precoce não apresentou diferenças significativas para FSTP com restrição da irrigação em 60% da capacidade de vaso, resultando em valores médios de 24,0 g; os efeitos de deficiência hídrica foram evidentes apenas quando a restrição da irrigação alcançou 20% da capacidade de vaso, com valor médio de 17,0 g; neste contexto, o presente estudo apresentou condição semelhante na manutenção da disponibilidade de água para as plantas, haja vista que a irrigação foi mantida com 30% de água disponível e mesmo assim as cultivares alcançaram altos valores dos componentes de rendimento. Avaliando a tolerância de duas cultivares de feijão Sayyad e D81083, Emam et al. (2010) relataram efeito da deficiência hídrica quando a supressão da irrigação foi inferior a 50%, a FSTP foi pouco superior a 4,0 g e 3,0 g por planta para as duas cultivares, respectivamente.

4.2.6 Fitomassa seca da raiz (FSR)

A característica de tolerância à seca é função do desenvolvimento do sistema radicular. Cultivares com estas características possuem genes relacionados à capacidade de expansão radicular prevenindo a cultura de maiores danos produtivos durante longos períodos de estiagem (ARUNYANARK et al., 2009).

Analisando as informações do teste F para FSR (Tabela 3 e Figura 11) são observadas diferenças estatísticas com maiores rendimentos de FSR para as cultivares IAPAR 81 e IPR

Tangará em comparação a IPR Curió. Porém, não houve diferença estatística significativa entre os níveis de disponibilidade hídrica. Mesmo assim, é possível observar tendência de maiores valores para os tratamentos cujo sensor de umidade foi posicionado a 0,30 m de profundidade.

Os melhores resultados alcançados por Do Vale et al. (2012), em casa de vegetação, para essas características foram relatados para as cultivares Pérola, IPR Chopim e IPR Uirapuru produzindo em média 0,35; 0,31 e 0,29 g de FSR, respectivamente. Estes valores foram suficientes para indicar tais cultivares como mais tolerantes a períodos prolongados de seca. Todavia, os resultados apresentados na Tabela 10 indicam que as cultivares avaliadas foram muito superiores em relação à produção de FSR o que pode facilitar um maior desempenho das cultivares estudadas em tolerar maiores períodos de supressão hídrica.

Além disso, a não observância de diferença estatística entre os tratamentos indica que menores lâminas de irrigação podem ser utilizadas, haja vista a capacidade potencial das cultivares em utilizar a água disponível em um perfil de solo mais profundo, nesse caso 1,0 m. Por outro lado, nota-se grande diferença entre as cultivares avaliadas com destaque superior para as cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará com média de 6,93 e 6,34 g de FSR e inferior para cultivar IPR Curió, igual a 3,57 g. Na pesquisa desenvolvida por Oliveira et al. 2008 a maior produção de FSR total ocorreu com umidade do solo equivalente a 60% do VTP resultando em 2,8 g por planta, quando a umidade do solo foi mantida a 20% do VTP os resultados foram pouco superior a 0,5 g indicando que nesse caso a cultivar denominada Capixaba não apresentou tolerância à deficiência hídrica. Novamente, contrastando com os resultados aqui observados.

Figura 11 - (A), (B) e (C), Fitomassa seca de raízes (g) de cultivares de feijão em camadas do perfil do substrato em diferentes níveis de disponibilidade hídrica. (D) Fitomassa seca total de raízes em função do monitoramento da irrigação a 0,15; 0,20 e 0,30 m de profundidade. Mesma letra minúscula e maiúscula indicam médias sem diferença estatística entre cultivares e tratamentos, respectivamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

4.2.7 Rendimento de grãos (RG) e Índice de colheita (IC)

Na Tabela 5 são apresentados os resultados dos tratamentos sobre o Rendimento de grãos (RG) das plantas de feijão. A cultivar IAPAR 81 apresentou maior rendimento no tratamento cujo tensiômetro estava posicionado a 0,20 m de profundidade equivalente a 23,59%; nos tratamentos com tensiômetro a 0,15 e 0,30 m não foram apreciadas diferenças significativas. Ou seja, disponibilidade hídrica superior a 463 mm podem representar tendência na redução do rendimento de grãos para esta cultivar.

O rendimento de grãos também foi diferenciado para a cultivar IPR Tangará. Analisando os dados contidos na Tabela 5 nota-se diferença estatística entre os tratamentos 0,15 m com os demais, este 26,54% inferior; todavia, comparado àqueles com sensor posicionado a 0,20 e 0,30 m não foram observadas diferenças entre si. De forma semelhante a cultivar IPR Curió apresentou rendimento de grãos em média 24,27% inferior, apenas para o tratamento com tensiômetro a 0,15 m, não diferindo estatisticamente para os tratamentos a 0,20 e 0,30 m.

Comparando o rendimento de grãos entre as cultivares, observa-se que para o tratamento com tensiômetro a 0,15 m houve correspondência entre as cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará diferentemente da cultivar IPR Curió que apresentou rendimentos inferiores em média igual a 32,35%. Com tensiômetro a 0,20 m perdurou a mesma diferença estatística, porém, com maior discrepância, em média igual a 38,71%. Nos tratamentos a 0,30 m houve diferença significativa entre as três cultivares, sendo que, IPR Tangará apresentou maior rendimento de grãos seguido por IAPAR 81 e IPR Curió, nesse contexto, as diferenças foram de 13,33% e 27,58% comparando as cultivares IAPAR 81 e IPR Curió com IPR Tangará.

Diante desses resultados pode-se concluir que as cultivares podem apresentar respostas produtivas distintas em relação à disponibilidade de água, mesmo pertencendo à mesma espécie. Nesse experimento, a cultivar IAPAR 81 mostrou-se mais produtiva com disponibilidade hídrica total de 463 mm e menos produtiva com 347 e 547 mm, permitindo obter melhores rendimentos com maior economia de água da ordem de 15,34%. Diferentemente, a cultivar IPR Tangará, resultou em menor produção com disponibilidade hídrica total de 347 mm apresentando tendência de maiores rendimentos na medida em que a disponibilidade hídrica foi elevada para 463 e 547 mm. Da mesma forma a cultivar IPR Curió, esta com habito de crescimento determinado e precocidade apresentou menores rendimentos quando a disponibilidade hídrica total foi de 256 mm, semelhante à IPR Tangará, houve tendência em aumentar os rendimentos de grãos com disponibilidade hídrica superiores e iguais

a 329 e 404 mm, demonstrando que é possível maximizar o uso da água na cultura do feijão alcançando o mesmo nível de produtividade com disponibilidade hídrica total de 463 mm para as cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará e 329 mm para a cultivar IPR Curió, proporcionando economia do recurso hídrico na ordem de 15,34 e 18,56%, respectivamente.

De acordo com Allen et al. (2000) os maiores requerimentos hídricos pela cultura do feijão dependem do clima, solo, cultivar e podem alcançar até 500 mm. Calvache et al. (1997) relatam requerimentos hídricos de 447 mm enquanto Muñoz-Perea et al. (2007) observaram nas cultivares Common Pinto, Common Red Mexican, NW 63, Othello, UI 259 e UI 320 que a irrigação recomendada, sem deficiência foi de 661 e 571 mm, em condição deficiência hídrica severa, lâminas de irrigação foram iguais a 378 e 201 mm, em dois anos consecutivos de estudo, 2003 e 2004 respectivamente.

Os resultados do Índice de colheita (IC) apresentados na Tabela 5 foram obtidos ao final da experimentação. No caso da cultivar IAPAR 81 o maior IC obtido foi para o tratamento com monitoramento da irrigação a 0,20 m de profundidade sendo igual a 0,43; nos tratamentos 0,15 e 0,30 m não foram observadas diferenças significativas apresentando valor de 0,39. A cultivar IPR Tangará também apresentou diferença significativa entre os tratamentos sendo superior para àquele com tensiômetro a 0,20 m de profundidade não sendo observada diferença estatística entre os tratamentos a 0,15 e 0,30 m. Por último, a cultivar IPR Curió apresentou diferença estatística somente entre o tratamento 0,15 m dos demais, com valor de 0,38. Nos tratamentos com tensiômetro a 0,20 e 0,30 não foram observadas diferenças significativas e o valor foi de 0,43.

Comparando as respostas entre as cultivares, apenas no tratamento 0,30 m nota-se diferença significativa entre a cultivar IPR Curió e as demais, nessa ocasião esta foi superior com valor de 0,43. Tais valores de IC corroboram com os resultados de Builes et al. (2011) avaliando seis cultivares de feijão (BAT 477, Morales, SEN 21, SEN 3, SER 16, SER 21) submetida a três diferentes níveis de umidade relataram para as cultivares mais tolerantes à deficiência hídrica (SER 21 e SEN 3) IC variando de 0,24 para 0,54 e 0,38 para 0,51 sem comprometimento do rendimento de sementes, mesmo em condição de deficiência hídrica. Diante disto pode-se considerar que as cultivares avaliadas apresentam capacidade de manter os aspectos produtivos quando submetidos ao desenvolvimento em condições de menor disponibilidade de água.

Bourgault et al. (2010) concluíram que foi mantido o IC para a cultura do feijão da espécie *Vigna radiata* (L.) Wilczek em condição de baixa disponibilidade hídrica, diferentemente dos resultados para plantas do gênero *Phaseolus* sp. Nos estudos conduzidos

por Ninou et al. (2012) os maiores valores de rendimento de grãos foram condicionados àquelas cultivares que apresentaram florescimento precoce e valores de IC superiores, nesse estudo o valor do IC foi de 0,37 para a cultivar Borlotto 54,2% superior à cultivar Green Crop, no presente estudo o maior valor de IC foi para cultivar precoce IPR Curió porém a mesma não foi a que apresentou maiores rendimentos produtivos.

4.3 Aspectos fisiológicos

4.3.1 Fotossíntese (A)

Os níveis de Fotossíntese líquida (A) apresentaram resposta significativa em função das cultivares e da disponibilidade hídrica (Tabela 6 e Figura 12). Os maiores valores encontrados para esta característica ocorreram aos 47 DAS, sobretudo para os tratamentos com sensor de umidade posicionado a 0,15 e 0,20 m de profundidade, o tratamento a 0,30 m apresentou valores superiores em diferentes períodos para a cultivar IPR Tangará e IPR Curió sendo estes ocorrido no estágio inicial do desenvolvimento, ou seja, aos 20 DAS, no caso da cultivar IAPAR 81 o maior valor de A foi observado aos 47 DAS. Nos primeiros tratamentos, pode-se considerar que o nível de estresse às plantas foi mínimo, haja vista que os valores médios de A mantiveram-se variáveis entre 15,57 e 3,39 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ nos estádios iniciais e finais de desenvolvimento, respectivamente.

De forma oposta, para os tratamentos cujo sensor foi posicionado a 0,30 m de profundidade observaram-se maiores variações dos níveis de A, comparativamente aos demais tratamentos. Nesse caso, as plantas demonstram redução drástica dessa característica principalmente aos 62 DAS, nas cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará, tais reduções foram da ordem de 98,25 e 77,26% em relação a avaliação ocorrida aos 47 DAS.

A cultivar IPR Curió apresentou decréscimo linear com redução de 28,97% para o mesmo período, citado anteriormente (Figura 12). O decréscimo da fotossíntese é mais intenso quando os níveis de água disponível às plantas é reduzido (MEDINA et al., 1999).

Tabela 6 - Teste F para fotossíntese líquida avaliada em três cultivares de feijão submetidas a diferentes níveis de disponibilidade hídrica

Fator de Variação	DAS	Cultivar	Profundidade do Tensiômetro	Interação	C.V. (%)
Fotossíntese líquida	20	2,78 ^{n.s.}	1,82 ^{n.s.}	1,78 ^{n.s.}	6,44
	35	0,75 ^{n.s.}	0,32 ^{n.s.}	3,39*	6,45
	47	3,71*	9,18**	2,79*	8,88
	62	16,04**	110,79**	13,94**	15,22
	72	41,82**	8,69**	21,27**	19,91
	82	1,89 ^{n.s.}	0,79 ^{n.s.}	1,78*	15,16

* Significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade e ^{n.s.} não significativo

Ao avaliar o comportamento das cultivares em função da disponibilidade hídrica fica evidente diversas oscilações ao longo do ciclo de crescimento das plantas, principalmente para aquelas que apresentaram ciclo tardio (IAPAR 81 e IPR Tangará), alternados entre valores maiores e menores. Esse comportamento segundo Ribeiro et al. (2004) é típico de indivíduos cuja capacidade de resiliência e adaptação às variações do ambiente são mais pronunciadas. Essa característica possivelmente contrasta com alguns estudos que se utilizaram somente da restrição hídrica, sem realizar reidratação, na cultura do feijão e observaram redução dos índices fisiológicos superiores aos observados nesse estudo.

De acordo com a Figura 12, observa-se que a cultivar IPR Curió quando submetida a uma maior oferta de água, com disponibilidade hídrica monitorada a 0,30 m não apresenta potencial para recuperação das atividades fotossintéticas quando comparado aos tratamentos cujo a disponibilidade hídrica foi monitorada a 0,15 e 0,20 m de profundidade. Essa resposta pode indicar maiores danos à cultivar na ocorrência de períodos prolongados de restrição hídrica em condições de sequeiro ou requerimento de irrigações mais frequentes com o intuito de preservar maiores níveis de umidade até o perfil de 0,20 m de profundidade.

Por outro lado, quando analisada as respostas das cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará foi observado que as mesmas podem ser dotadas de mecanismos que possibilitam a recuperação das condições de desenvolvimento após eventos de restrição hídrica e reidratação, como consequência os danos fisiológicos podem ser amenizados no caso de alguma restrição hídrica de maior expressão.

Complementarmente, a cultivar IPR Tangará pode ser considerada entre as três cultivares avaliadas aquela que melhor recuperou-se de um evento de deficiência hídrica, basta observar a resposta da cultivar para a característica A no período compreendido entre 47 e 72 DAS (Figura 12). No primeiro período o nível de A encontrava-se adequado, ao desenvolvimento da planta e igual a $15,27 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, depois decresceram aos 62 DAS resultado em $3,47 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e posteriormente o valor de A alcançou um patamar semelhante ao observado aos 47 DAS, igual a $13,75 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, isso só foi possível em virtude das características genéticas da cultivar e dos danos ocorridos ao aparato fotossintético da planta ser ainda reversível, caso contrário seria letal ao vegetal. Resultado semelhante foi observado para a cultivar IAPAR 81, porém com capacidade de recuperação das atividades fotossintéticas em 37,27% em relação ao mesmo período.

Estudos conduzidos por Dias et al. (2010) relatam redução de A em plantas de feijão submetidas a estresse severo 21 DAS; com umidade do substrato equivalente a 30% da capacidade de vaso, os valores de A foram em média 36,36% inferiores, acompanhados da redução da condutância estomática em aproximadamente 53,13% e declínio na atividade enzimática da Rubisco (RuBP), enzima chave do processo fotossintético, que em condições ideais de umidade apresentou valor médio de 25,00 e em condição oposta $13,00 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Nesse mesmo estudo, a capacidade de regeneração da (RuBP) não foi comprometida, hipótese comprovada pela não redução da Concentração Interna de Carbono (C_i), no mesófilo, aferida pelo medidor de gases, que permaneceu aproximadamente igual a $270 \mu\text{mol mol}^{-1}$, valor satisfatório para atividade desta enzima.

Figura 12 - Variação da Fotossíntese ao longo do ciclo de desenvolvimento das plantas de feijão com monitoramento da irrigação nas profundidades de 0,15; 0,20 e 0,30 m. Mesma letra minúscula e maiúscula indicam médias sem diferença estatística entre cultivares e tratamentos, respectivamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Semelhantemente, ao avaliar duas cultivares de feijão (Borloto e Green Crop) em condições de campo por dois anos consecutivos (2008 e 2009) submetidas a quatro regimes hídricos distintos baseados na reposição hídrica de 0 (sem irrigação); 25; 50; 75 e 100% da evapotranspiração de referência, Ninou et al. (2012) obtiveram valores de A iguais a 2,1; 6,8; 9,6; 11,1 e 12,7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; respectivamente. Estes foram acompanhados de uma média de 239,2 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de C_i em todos tratamentos, indicando que, apesar da supressão hídrica ter afetado a assimilação do carbono, em nível bioquímico a enzima RuBP teve sua integridade preservada. Esses resultados corroboram com os apresentados no presente estudo; ao longo do

ciclo da cultura a média geral para C_i foi de 239,62 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, Tabela 8, indicando que as variações hídricas no substrato por imposição dos tratamentos não foram suficientes para degenerar o aparato fotossintético das plantas e provavelmente reduzir a capacidade regenerativa da RuBP, isto possibilitou às cultivares estudadas regeneração, após um evento de estresse, nesse caso observado principalmente a partir de 62 DAS para aqueles tratamentos com disponibilidade hídrica monitorada a 0,30 m de profundidade.

Vários mecanismos são ativados com a supressão hídrica das plantas, tais como: alterações morfológicas, fechamento estomático, redução da assimilação de carbono dentre outras, no caso do feijão sob restrição hídrica moderada a atividade da RuBP apesar de ser afetada a mesma não perde a capacidade de regeneração e; encontrando novamente condições adequadas à sua atividade a mesma torna-se funcional, caso contrário ocorre degeneração e completa inativação. A principal consequência dessas respostas à supressão hídrica afeta diretamente o aparato fotossintético da cultura em maior ou menor intensidade (CASTRILHO et al., 2001; PARRY et al., 2002; DIAS et al., 2007).

Tabela 7 - Resultados do teste F para Concentração Interna de Carbono no Mesófilo Foliar (C_i) avaliada em três cultivares de feijão submetidas a níveis de disponibilidade hídrica

Fator de Variação	DAS	Cultivar	Profundidade do Tensiômetro	Interação	C.V. (%)
C_i	20	2,46 ^{n.s.}	3,25 ^{n.s.}	2,16 ^{n.s.}	2,86
	35	0,39 ^{n.s.}	0,73 ^{n.s.}	0,32 ^{n.s.}	3,78
	47	1,69 ^{n.s.}	6,45**	0,79 ^{n.s.}	13,90
	62	2,98 ^{n.s.}	1,00 ^{n.s.}	6,01**	13,12
	72	24,42**	5,09*	13,23**	25,27
	82	0,01 ^{n.s.}	4,31*	0,0002**	28,51

* Significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade e ^{n.s.} não significativo.

Tabela 8 - Concentração Interna de Carbono (Ci) em função da profundidade do sensor e dias após a semeadura

Cultivar	Profundidade do sensor (m)	Ci					
		20	35	47	62	72	82
IAPAR 81	0,15	273,25aA	287,75aA	209,25aA	285,00aA	111,00bA	237,50aA
	0,20	269,00aA	284,50aA	240,25aA	319,00aA	197,50aA	170,75aA
	0,30	281,25aA	292,50aA	202,25aA	253,75bA	159,25aAB	164,75aA
IPR Tangará	0,15	280,25aA	289,00aA	232,25aA	278,50aB	24,00cB	239,00aA
	0,20	263,25aA	288,75aA	232,50aA	288,75aB	57,00bB	172,75aA
	0,30	268,25aA	293,00aA	193,00aA	372,50aA	185,00aA	167,50aA
IPR Curió	0,15	279,00aA	291,00aA	260,75aA	284,00aA	237,75aA	..
	0,20	276,75aA	282,50aA	253,25aAB	304,50aA	168,25aB	..
	0,30	277,25aA	285,50aA	201,50aB	241,00bA	170,25aB	..

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Além disso, os efeitos da restrição hídrica podem ser diferentes dependendo do estágio fenológico da cultura. Neste estudo, foram observados valores relativamente adequados de A, principalmente após os eventos de supressão da irrigação naquelas fases de demanda hídrica elevadas, aos 47 DAS. Porém, a constante reposição de água para reestabelecimento da umidade próximo à capacidade de vaso permitiram às cultivares recuperação das atividades fisiológicas independentemente do tratamento aplicado, cabe ressaltar que essa recuperação foi menos expressiva para a cultivar IPR Curió com disponibilidade hídrica monitorada a 0,30 m de profundidade.

Brandão et al. (2013) avaliaram algumas características fisiológicas da cultivar de feijão IPR Colibri em três fases distintas de desenvolvimento: crescimento vegetativo, florescimento e enchimento de grãos com manejo da irrigação baseada em 100, 75, 50 e 25% da Evapotranspiração de Referência (ET_0) em dois tipos de solo, Nitossolo vermelho distrófico e Latossolo vermelho. Os autores identificaram maiores níveis de A quando a irrigação foi realizada com base em 100% da ET_0 alcançando valores de aproximadamente 16,0 e 18,0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, semelhantes aos observados neste estudo inicialmente, durante o desenvolvimento vegetativo, 13,0 e 9,0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, na fase de florescimento e 12,0 e 9,0 no enchimento de grãos, considerando o Nitossolo vermelho distrófico e o Latossolo vermelho, respectivamente. Em si tratando da irrigação com referência a 25% da ET_0 os valores foram próximos de 0,0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para os tratamentos desenvolvidos no Nitossolo vermelho distrófico e em média igual a 12,0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para parcelas desenvolvidas em Latossolo vermelho.

François (2012) avaliou as relações hídricas em plantas de feijão utilizando os mesmos tratamentos citados anteriormente e relatou redução linear de A quando as plantas foram irrigadas com 100% em comparação com a irrigação realizada com 25% da ET_0 , nesse caso, os respectivos valores foram de 26,77 e 5,9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Ao avaliar cinco cultivares de feijão Santos et al. (2009), submeteram plantas de feijão a estresse moderado e a reidratação após 10 dias sem irrigação; observaram redução drástica da A , evidentes entre 8 e 10 dias após a supressão hídrica com valores médios de 15,0 e 3,0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ considerando aquelas cultivares com irrigação plena e sob restrição respectivamente; depois de irrigados novamente, as cultivares apresentaram resultados que confirmaram a recuperação da capacidade fotossintética, sendo praticamente iguais, com valor médio 13,0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ nas duas condições de contorno estabelecidas.

Souza et al. (2003) relataram maiores alterações para a cultivar Jalo Precoce. Em condição de irrigação plena, estresse moderado e no processo de reidratação, esta cultivar apresentou valores médios de A iguais a 18,0; 10,0 e 12,0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente, valores estes, reduzidos em comparação às outras cultivares avaliadas Aporé, Jalo 558 e Guarumbé. Dessa maneira, os resultados sugerem menor adaptação da cultivar Jalo Precoce a ambientes onde a restrição hídrica seja mais intensa.

Em outro estudo Souza et al. (2005) avaliaram as trocas gasosas ao longo do tempo em duas cultivares de feijão (Jalo Precoce e Garumbé) durante a irrigação plena, sob déficit e em regime de déficit hídrico seguido de reidratação, 36 horas após supressão da irrigação. Os autores concluíram que o período de imposição do estresse hídrico nas duas cultivares reduziu significativamente os valores de A , que apresentou médias de 15,18; 2,88 e 9,84 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para a cultivar Jalo Precoce e de 15,50; 4,43 e 7,45 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para cultivar Guarumbé nos respectivos tratamentos com irrigação plena, sob déficit e reidratação. Nota-se que, por ocasião da recuperação dos níveis de A os mesmos não foram reestabelecidos em sua totalidade sendo mais expressivo para cultivar Jalo Precoce que recuperou sua condição fisiológica de assimilar CO_2 em 54,27% enquanto a cultivar Guarumbé esta recuperação foi de 51,94%. Semelhantemente ao ocorrido com as cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará em menor e maior intensidade respectivamente, neste estudo.

A maior plasticidade genética das cultivares avaliadas, neste estudo, em regenerar fisiologicamente após cada evento de irrigação foi fator determinante para manutenção das taxas de A e C_i sugerindo que tais cultivares possam ser mais tolerantes a ambientes cuja restrição hídrica seja mais pronunciada, principalmente quando considerada as cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará.

4.3.2 Transpiração (E) e Condutância Estomática (g_s)

A Transpiração (E) das plantas apresentou diferenças significativas entre as cultivares e em função da disponibilidade hídrica (Tabela 9). Tais diferenças ocorreram em todas as avaliações em função das cultivares, tratamentos e/ou na interação os resultados foram superiores na fase inicial de desenvolvimento das plantas, entre 20 e 35 DAS em todas as cultivares estudadas e decrescentes ao longo da experimentação (Figura 13). Inicialmente, quando as plantas apresentavam 35 DAS o tratamento com sensor de umidade posicionado a 0,30 m de profundidade apresentou diferença significativa entre os demais tratamentos com redução média de 14,89; 13,67 e 11,22% considerando as cultivares IAPAR 81, IPR Tangará e IPR Curió, respectivamente. As maiores reduções para os níveis de E, foram observadas 62 DAS. Novamente o tratamento com sensor posicionado a 0,30 m de profundidade apresentou maior diferença. Nesse caso, a cultivar IAPAR 81 e IPR Tangará apresentaram redução de 95,11 e 76,50%, respectivamente. Para a cultivar IPR Curió a diferença foi menos expressiva e igual a 6,5%, comparando o resultado médio dos tratamentos 0,15 e 0,20 com sensor a 0,30 m de profundidade. Este período corresponde ao enchimento de grãos, fase em que a planta demanda mais água, principalmente na camada superficial do solo, onde está concentrado a maioria das raízes ativas; porém devido às condições impostas neste tratamento, tal perfil encontrava-se, momentaneamente, com água disponível insuficiente para atendimento das necessidades hídricas da planta, este cenário foi revertido por ocasião de uma nova irrigação, elevando os níveis de água disponível correspondente à camada de 0 – 0,30 m para próximo da capacidade de vaso.

Aos 72 DAS, as variações de E foram distintas entre as cultivares e marcado pela recuperação dos resultados para as cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará. Comparando com os resultados aos 62 DAS, a cultivar IAPAR 81 apresentou redução de 42,92% para o tratamento a 0,15 m; 10,19% no tratamento a 0,20 m. Em relação ao tratamento 0,30 m pôde-se observar incremento nos níveis de E em 91,43%. De forma distinta, a cultivar IPR Tangará apresentou reduções de 73,54 e 64,61% nos tratamentos com sensor a 0,15 e 0,20 m de profundidade, respectivamente.

Tabela 9 - Teste F para Transpiração (E) e Condutância Estomática (gs) em três cultivares de feijão submetidas a

Fator de Variação	DAS	Cultivar	Profundidade do Tensiômetro	Interação	C.V. (%)
Transpiração	20	3,67*	0,23 ^{n.s.}	0,80 ^{n.s.}	4,53
	35	0,29 ^{n.s.}	10,30**	0,09*	8,72
	47	0,25 ^{n.s.}	0,74 ^{n.s.}	1,17 ^{n.s.}	14,91
	62	18,06**	175,51**	21,28**	12,87
	72	14,76**	21,87**	23,78**	22,72
	82	1,20 ^{n.s.}	2,97 ^{n.s.}	8,51**	12,25
Condutância Estomática	20	4,06*	1,03 ^{n.s.}	0,70 ^{n.s.}	9,95
	35	1,05 ^{n.s.}	0,33 ^{n.s.}	0,74 ^{n.s.}	15,31
	47	2,42 ^{n.s.}	8,84**	3,23*	22,51
	62	7,29**	57,39**	10,41**	20,86
	72	22,97**	40,27**	31,56**	33,13
	82	7,41*	2,84 ^{n.s.}	1,25 ^{n.s.}	30,90

níveis de disponibilidade hídrica

* Significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade e ^{n.s.} não significativo

Em relação ao tratamento a 0,30 m foi observado o maior nível de recuperação fisiológica, igual a 91,43 e 82,26% para as cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará, respectivamente. Nesse período, a cultivar IPR Curió apresentou menor variação de E com valores médios de $1,01 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e, nesta ocasião, indicaram final do ciclo de produção. As outras duas cultivares aos 82 DAS apresentaram valores de E mínimos e sem diferenças significativas entre tratamentos e cultivares. Os valores médios observados corresponderam a $0,13 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para as cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará representando a maturidade fisiológica das parcelas indicando fim do período de crescimento e produtivo (Figura 13).

Figura 13 - Transpiração das cultivares de feijão com tensiômetro posicionado a 0,15; 0,20 e 0,30 m de profundidade. Mesma letra minúscula e maiúscula indicam médias sem diferença estatística entre cultivares e tratamentos, respectivamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

A Condutância Estomática (g_s) apresentou diferenças estatísticas em relação às cultivares e da disponibilidade hídrica, aos 20, 47, 62 e 72 DAS (Tabela 9 e Figura 14). O comportamento das cultivares foi diferenciado para essa característica, aos 20 DAS as diferenças estatísticas ficaram restritas apenas entre as cultivares. Nesse período destaque para os valores médios de g_s superiores para a cultivar IPR Curió e menores para IAPAR 81 iguais a 0,51 e 0,45 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, a cultivar IPR Tangará apresentou resultado intermediário aos demais. Aos 47 DAS a cultivar IPR Curió foi a única a apresentar diferença significativa, os resultados indicaram semelhança nos tratamentos com sensor a 0,15 e 0,20 m de profundidade com media

de $0,41 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e redução para o tratamento com disponibilidade hídrica monitorada a 0,30 m de 44,58%.

Aos 62 DAS o comportamento estatístico foi significativo e semelhante para as cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará. Nesse caso, houve diferença entre os tratamentos 0,15 e 0,20 m em relação ao 0,30 m, neste foram observados os menores resultados. Analisando individualmente a cultivar IAPAR 81 com sensor a 0,15 e 0,20 m de profundidade os resultados pouco variaram, enquanto que para o sensor a 0,30 m houve decréscimo de 93,85%. Tal condição refletiu a maior sensibilidade à deficiência hídrica, nas camadas superficiais do solo (0 - 0,20 m), dessa cultivar durante essa fase fenológica e monitoramento da irrigação considerando camadas mais profundas (0,30 m). Para a cultivar IPR Tangará houve redução da g_s em todos tratamentos, comparativamente à avaliação anterior; porém sem diferenças estatísticas com sensor a 0,15 e 0,20 m estes apresentaram média de $0,26 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Para os tratamentos a 0,30 m a redução foi de 66,67% em relação à avaliação anterior e de 69,81% para o mesmo período em relação aos tratamentos a 0,15 e 0,20 m. Na cultivar IPR Curió os valores da g_s foram superiores para o tratamento com tensiômetro a 0,20 m em 36% em relação à média de daqueles a 0,15 e 0,30 m de profundidade; cabe ressaltar que este último não foi estatisticamente distinto em relação aos demais.

No período correspondente a 72 DAS foi observado redução dos valores de g_s em todas cultivares para nos tratamentos com sensor a 0,15 e 0,20 m. A cultivar IAPAR 81 apresentou maior valor para o tratamento a 0,20 m significativamente distinto quando o tensiômetro encontrava-se posicionado a 0,15 m. O tratamento a 0,30 m apresentou média igual a $0,09 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, apesar de representar uma recuperação das atividades relativas às trocas gasosas comparativamente ao resultado anterior não houve diferença estatística entre os demais. Para a cultivar IPR Tangará houve efeito significativo dos três tratamentos com destaque para o incremento dos níveis de g_s com tensiômetro a 0,30 m; que resultou em valor semelhante a avaliação ocorrida aos 47 DAS, este incremento foi de 68% em relação aos 62 DAS, estas respostas fisiológicas podem proporcionar maiores índices produtivos em função da possível redução do estresse hídrico. Apesar da tendência de maior dependência por água entre as cultivares estudadas a IPR Tangará demonstrou capacidade em tolerar, não somente, períodos de deficiência hídrica, assim como, promover a recuperação de suas funções fisiológicas a um nível adequado. Nesse período a cultivar IPR Curió apresentou média de $0,04 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ indicando maturidade fisiológica e encerramento do ciclo produtivo esse mesmo processo ocorreu para as cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará, porém aos 82 DAS.

Ribeiro et al. (2004) relata que um déficit hídrico prévio pode causar tolerância das plantas em fases posteriores modificando a resposta dos indivíduos em relação à g_s e A ; além disso, o mesmo autor ressalta que este comportamento é dependente das características genéticas de cada cultivar. A resposta mais comum das plantas em condição de deficiência hídrica é o fechamento dos estômatos que por sua vez reduzem a quantidade de CO_2 disponível às plantas promovendo redução nas taxas de fotossíntese (SANTOS et al., 2009). De acordo com Flexas et al. (2006) o fechamento estomático durante um longo prazo provocará limitações ao desenvolvimento das plantas pelo comprometimento das reações relativas à carboxilação.

Figura 14 - Condutância estomática de cultivares de feijão com manejo da irrigação em função dos tensiômetros posicionados a 0,15; 0,20 e 0,30 m de profundidade. Mesma letra minúscula e maiúscula indicam médias sem diferença estatística entre cultivares e tratamentos, respectivamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Avaliando a g_s em cinco genótipos de feijão submetido à restrição hídrica e posteriormente à reidratação Santos et al. (2009) observaram que em condições de deficiência hídrica a g_s apresentou valores mínimos pouco superior a $0,03 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, todavia quando irrigados foi possível observar a recuperação das cultivares, nesse caso, a g_s média foi superior a $0,20 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, similar aos tratamentos cuja supressão hídrica não ocorreu. Esses resultados corroboram com os observados nesta pesquisa, comparando-se a cultivar IPR Tangará aos 72 DAS e sensor a 0,30 m de profundidade, o resultado foi superior aos demais tratamentos com incremento de 3,12 vezes em relação à g_s realizada anteriormente, essa resposta fisiológica é possível desde que seja considerada a reposição hídrica (reidratação) e fase fenológica das plantas antes do comprometimento de reações vitais ao desenvolvimento vegetal.

Um exemplo disto é descrito por Brandão et al. (2013), os autores relataram que manejando a irrigação com base em 100% ET_0 no estágio fenológico de desenvolvimento vegetativo, florescimento e enchimento de grãos os valores da g_s foram, respectivamente de 0,20; 0,15 e 0,10 $\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para plantas de feijão desenvolvidas em Nitossolo vermelho distrófico e de 0,22; 0,10 e 0,07 $\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ naquelas crescidas em Latossolo vermelho. Nesse mesmo estudo, os valores encontrados para transpiração foram aproximadamente de 1,8; 1,2 e 1,3 no Nitossolo vermelho distrófico e 2,0; 0,8 e 0,9 no Latossolo vermelho.

François (2012) avaliou as relações hídricas em plantas de feijão utilizando irrigação com base em 25, 50, 75 e 100% ET_c e observaram redução linear na g_s aos 66 e 69 DAS. Nesse experimento, o maior valor de g_s encontrado foi de $1,36 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ em plantas irrigadas a 100% ET_c e o menor para parcelas irrigadas a 25% da ET_c equivalente a $0,26 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, ou seja, redução de 80,88% em relação ao tratamento sem déficit de irrigação. A redução da g_s foi acompanhada da transpiração das plantas em média igual a $11,65 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ naquelas parcelas sob irrigação plena e $8,05 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ nos tratamentos submetidos à uma menor oferta de água, equivalente a 25% da ET_c .

A perda de água das plantas é regulada em função da atividade das células-guardas, presente nos estômatos, e da elevação das taxas de transpiração nos vegetais, ao longo do dia. Essa perda deve-se a incapacidade de alguns vegetais absorverem água suficientemente para repor as demandas do processo transpiratório, que por sua vez, estão na dependência das necessidades da planta e atmosfera (SHIMAZAKI et al., 2007). Nos estudos conduzidos por Souza et al. (2005) as cultivares de feijão Jalo Precoce e Guarumbé apresentaram diferenças significativas quando da imposição do déficit de irrigação e em relação à capacidade de recuperação medida quando foi realizada reidratação das plantas mantidas durante 36 horas sem irrigação. Nesse contexto, os resultados alcançados foram de 2,19; 0,46; 2,63 $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

para os parâmetros de E, considerando a cultivar Jalo Precoce e de 5,76 0,80; 1,57 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para a cultivar Guarumbé no mesmo parâmetro. Em relação à g_s os resultados remeteram a 0,130; 0,029 e 0,190 $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para Jalo Precoce e 1,06; 0,043 e 0,061 $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para cultivar Guarumbé nas respectivas situações de irrigação plena, sob déficit e reidratação.

Em outra pesquisa, conduzida por Souza et al. (2003) valores de g_s e E variaram em função dos tratamentos de irrigação plena, estresse hídrico moderado e nos tratamentos submetidos à reidratação, nesse estudo, a cultivar que apresentou menor estabilidade ao estresse abiótico foi a Jalo Precoce; nesse caso, a g_s assumiu os respectivos valores: 0,43; 0,05 e 0,06 $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, enquanto que, para a cultivar Jalo 558 os resultados foram: 0,60; 0,20; 0,60 $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, ou seja apesar das cultivares escolhidas sofrerem com o estresse moderado a cultivar Jalo 558 apresentou melhor capacidade de recuperar as funções relativas às trocas gasosas.

De acordo com Taiz & Zeiger (2013), o fechamento dos estômatos é considerado uma das principais barreiras de recurso dos vegetais contra um evento de estresse por seca seguido por redução da área foliar e crescimento radicular. O fechamento estomático é uma estratégia de curto prazo em função da sua alta plasticidade e rapidez.

Ferraz et al. (2012) avaliaram três cultivares de feijão (G2227, CIAT G6490, BAT 477) com o intuito de conhecer as taxas fotossintéticas (A) e de transpiração (E) dessas cultivares, em condição do semiárido brasileiro. Os autores relataram valores de A da ordem de 21,3; 19,5 e 19,8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Esses foram acompanhados de alterações na C_i , que por sua vez não variou significativamente nas três cultivares, assumindo valores médios de 277,0 e 289,6 $\mu\text{mol mol}^{-1}$. De acordo com Jadoski et al. (2005) a concentração interna de carbono no mesófilo foliar (C_i) está diretamente condicionada às atividades de fotossíntese, abertura e fechamento estomático, que por sua vez estão estritamente atreladas às condições ambientais, ou seja, em condições de estresses abióticos, por exemplo, o fechamento estomático poderá conferir às plantas menor taxa de assimilação de CO_2 (A), caso contrário, a maior abertura dos estômatos poderá favorecer elevação nas taxas de assimilação de CO_2 (A).

Com estes resultados observa-se que as plantas de feijão, dependendo da cultivar, pode apresentar distintos graus de adaptação ou recuperação a um evento de deficiência hídrica. Avaliando os resultados da g_s e E fica evidente que as cultivares estudadas apresentam forte tendência em manter a estabilidade de suas funções fisiológicas em condições adversas de irrigação, reestabelecendo as condições de equilíbrio como observado nas avaliações ocorridas entre 62 e 72 DAS naqueles tratamentos em que a supressão da irrigação foram mais intensas, principalmente, destacando-se nesse caso as cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará.

4.3.3 Eficiência da Fotossíntese (F_v/F_m)

Os resultados da Eficiência da Fotossíntese (F_v/F_m) apresentaram diferença estatística nas avaliações realizadas aos 62 DAS (Tabela 10). A (Figura 15) representa os resultados observados ao longo do desenvolvimento das plantas, nela é possível observar que os menores valores foram obtidos aos 72 e 82 DAS para a cultivar IPR Curió e as cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará todas apresentaram valor médio, ao final do ciclo igual a 0,79. Mesmo reduzido, de acordo com Schreiber et al. (1994) valores de F_v/F_m entre 0,75 e 0,85 refletem plantas em bom estado fisiológico.

A literatura internacional relata a utilização da relação F_v/F_m para identificação de plantas mais ou menos tolerantes à deficiência hídrica. Estudos conduzidos por Saglan et al. (2011) avaliando quatro cultivares de feijão, identificaram plantas mais tolerantes baseando-se nos resultados de F_v/F_m . Os resultados não indicaram diferença significativa para nenhuma das quatro cultivares avaliadas, dez dias após supressão hídrica no estágio de florescimento, apresentando valor médio de 0,80.

Tabela 10 - Teste F para Eficiência da Fotossíntese (F_v/F_m) avaliada em três cultivares de feijão submetidas a

Fator de Variação	DAS	Cultivar	Profundidade do Tensiômetro	Interação	C.V. (%)
Eficiência da Fotossíntese	20	3,79 ^{n.s.}	2,18 ^{n.s.}	0,45 ^{n.s.}	0,61
	35	1,31 ^{n.s.}	0,33 ^{n.s.}	0,45 ^{n.s.}	0,64
	47	0,94 ^{n.s.}	5,82 ^{n.s.}	0,59 ^{n.s.}	0,96
	62	23,01**	15,78**	3,03*	1,14
	72	1,07 ^{n.s.}	0,09 ^{n.s.}	0,18 ^{n.s.}	6,83
	82	0,01 ^{n.s.}	0,25 ^{n.s.}	0,02 ^{n.s.}	6,40
níveis de disponibilidade hídrica					

* Significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade e ^{n.s.} não significativo.

Resultados semelhantes foram apresentados por Santos et al. (2009) que observaram constância e similaridade dos resultados entre os tratamentos em que plantas de feijão submetidas a um nível de estresse hídrico e reidratação por irrigação das parcelas a qual a supressão hídrica tinha sido realizada. A relação F_v/F_m apresentou resultados médios de 0,80 nas duas condições, indicando ausência de danos ao aparato fotossintético possibilitando às cultivares avaliadas retornarem à condição inicial estabelecida antes da deficiência hídrica.

Ao avaliar duas cultivares de feijão (Tiber e Starozagorski) em regime de irrigação plena e déficit, Razinger et al. (2010) relataram estabilidade nos valores de F_v/F_m que foram em média iguais a 0,83; este valor foi diferente para a cultivar Starozagorski quando submetida à deficiência hídrica na terceira semana, registrando valor de 0,80 que retornou à condição inicial após reidratação.

Todavia, resultados contrários também são comumente relatados e atribuídos à cultivares de feijão que não apresentam capacidade de contorno em condições de estresse, como será visto adiante. Segundo Prado & Casali (2006) a redução do carbono no ciclo de Calvin é a via principal para que a planta possa fazer uso eficiente da energia luminosa, em períodos de estresse, nessa ocasião, cria-se um excedente de energia que por sua vez desencadeia uma série de eventos envolvendo todo aparato fotossintético, a sucessão desses eventos podem garantir aclimação do vegetal ao novo ambiente, possibilitando alta relação F_v/F_m ou diminuição nas taxas de fotossíntese (assimilação de carbono e baixa relação F_v/F_m).

Ao avaliar oito cultivares de feijão submetidas à irrigação quando a Evapotranspiração Acumulada do Tanque Classe A (ETC_{ac}) foi de 60 e 110 mm Ghanbari et al. (2013) encontraram valores discrepantes de F_v/F_m para as condições de estresse hídrico e aqueles tratamentos onde as plantas foram irrigadas plenamente. Os resultados indicaram valores médios de 0,66 e 0,86 para tratamentos com e sem deficiência hídrica, respectivamente.

De acordo com Dias et al. (2010) a relação F_v/F_m apresentou redução em seus estudos. Os valores iniciais encontrados para o feijão aos 21 DAS foram de 0,65 e 0,55 submetidos a uma saturação luminosa pouco inferior a $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ diferindo estatisticamente pelos tratamentos, com e sem deficiência hídrica; contudo esses valores foram decrescentes na medida em que a saturação luminosa era elevada até $800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, a partir desse valor, não apresentou diferenças estatísticas com saturação superior e equivalente a $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, quando ocorre fotoinibição. Durante toda experimentação os valores mais reduzidos de F_v/F_m foram encontrados em tratamentos cuja deficiência hídrica era mais pronunciada sugerindo que, sob estresse hídrico, plantas de feijão utilizam com menor eficiência a energia luminosa para manutenção das atividades vitais do vegetal, dissipando energia de diferentes formas, principalmente calor.

Dessa maneira, considerando as respostas das três cultivares avaliadas, os diferentes tratamentos e as informações contidas na literatura pode-se afirmar que independente da disponibilidade hídrica não foi possível detectar alterações no aparato fotossintético suficientes para o comprometimento do desenvolvimento das plantas que juntamente com a enzima RuBP,

preservada, garantiram recuperação das plantas de feijão nos momentos em que a disponibilidade hídrica no substrato foi menor.

Figura 15 - Resultados da Eficiência da Fotossíntese (F_v/F_m) com monitoramento da irrigação nas profundidades de 0,15; 0,20 e 0,30 m em três cultivares de feijão. Mesma letra minúscula e maiúscula indicam médias sem diferença estatística entre cultivares e tratamentos, respectivamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

4.3.4 Eficiência no uso da água instantânea (A/E)

A eficiência no uso da água instantânea ($EUA_{instantânea}$) apresentou diferenças significativas ao longo do desenvolvimento das plantas (Tabela 11 e Figura 16). Para a cultivar IAPAR 81 não foi observada diferenças estatísticas entre os tratamentos no período de 20, 35, e 47 DAS, apresentando valores médios de 4,21; 4,17 e 6,67 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$,

respectivamente. Porém, aos 62 DAS foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos com tensiômetro posicionado a 0,15 e 0,30 m de profundidade, nesse caso, superior para o primeiro em 55,08%. A próxima diferenciação entre tratamentos ocorreu aos 82 DAS com superioridade do tratamento a 0,30 m em 85,95% comparativamente ao tensiômetro a 0,15 m; nesse período o tratamento a 0,20 m apresentou resultado intermediário.

Tabela 11 - Teste F para Eficiência Instantânea no Uso da Água ($EUA_{instantânea}$) em três cultivares de feijão

Fator de Variação	DAS	Cultivar	Profundidade do Tensiômetro	Interação	C.V. (%)
A/E	20	4,48*	0,94 ^{n.s.}	2,52 ^{n.s.}	7,55
	35	1,11 ^{n.s.}	11,64**	1,36 ^{n.s.}	9,74
	47	2,28 ^{n.s.}	1,13 ^{n.s.}	0,03**	13,28
	62	11,78**	1,47 ^{n.s.}	6,16**	21,63
	72	26,49**	10,64**	4,59**	20,64
	82	3,92 ^{n.s.}	3,41 ^{n.s.}	10,65**	25,46

submetidas a níveis de disponibilidade hídrica

* Significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade e ^{n.s.} não significativo

A cultivar IPR Tangará apresentou diferença significativa entre os tratamentos aos 62 DAS, com superioridade do tratamento com tensiômetro posicionado a 0,30 m de profundidade em 42,27%. Não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos a 0,15 m e 0,30 m; nesse mesmo período. Quando as plantas apresentaram 72 DAS a $EUA_{instantânea}$ foi superior para o tratamento com tensiômetro a 0,15 m e sem diferença para os tratamentos a 0,20 e 0,30 m, diferentemente da avaliação anterior. Ao final do ciclo de desenvolvimento, 82 DAS, são observados os maiores incrementos nos valores de $EUA_{instantânea}$, nesse período os tratamentos com tensiômetro a 0,15 e 0,30 m não foram distintos estatisticamente, nesse período o tratamento 0,20 m foi 69,63% superior.

A cultivar IPR Curió apresentou diferença significativa entre tratamentos somente aos 35 DAS com superioridade quando o tensiômetro foi posicionado a 0,30 m de profundidade em 26,82% comparativamente à média obtida nos tratamentos a 0,15 e 0,20 m de profundidade. Os resultados pouco variaram até o fim do ciclo das plantas quando que foi em média, igual a $4,05 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$.

Figura 16 - Eficiência Instantânea no Uso da Água ($EUA_{instantânea}$) de cultivares de feijão com manejo da irrigação em função dos tensiômetros posicionados a 0,15; 0,20 e 0,30 m de profundidade. Mesma letra minúscula e maiúscula indicam médias sem diferença estatística entre cultivares e tratamentos, respectivamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

De forma geral pode-se inferir que alterações da $EUA_{instantânea}$ podem induzir as plantas ao aumento da $EUA_{instantânea}$. Resultados semelhantes foram observados por Lima et al. (2008) os autores concluíram que a $EUA_{instantânea}$ aumenta na medida em que as plantas são submetidas à menor oferta de água utilizando-a mais eficientemente, nesse estudo, os autores salientaram que as cultivares avaliadas (Marataoã e Gurgéia) em condição de semiárido brasileiro submetidas à deficiência hídrica sofreram redução significativa da $EUA_{instantânea}$ seis dias após a implantação dos tratamentos, em outra cultivar (Radiante), os efeitos da restrição hídrica foram

observados a partir do quarto dia com valores médios de 0,11; 0,17 e -0,40 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$, porém todas cultivares conseguiram recuperar as atividades fisiológicas após a reidratação para valores médios de 4,35; 4,33 e 4,27 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$, respectivamente, estes valores podem ser considerados satisfatórios para o cultivo do feijão.

Segundo Jaimez et al. (2005) o aumento da $\text{EUA}_{\text{instantânea}}$ está relacionado à redução das taxas de fotossíntese e transpiração; sendo assim a variação desses resultados podem estar associados desde aos fatores abióticos como àqueles relacionados ao estágio fenológico da cultura. Independentemente do resultado, o mesmo irá relacionar a quantidade de carbono que a planta fixa por cada unidade de água que perde. Taiz & Zeiger (2013), concluíram que as trocas gasosas sofrem influência direta das condições ambientais e que reduções da $\text{EUA}_{\text{instantânea}}$ podem estar fortemente associadas à radiação solar e variações da temperatura e umidade relativa do ar.

4.3.5 Eficiência no uso da água extrínseca (A/g_s)

A Tabela 12 e a Figura 17 apresentam os resultados da eficiência no uso da água extrínseca ($\text{EUA}_{\text{extrínseca}}$) para as três cultivares de feijão submetidas a diferentes níveis de água no solo. As diferenças estatísticas ocorreram inicialmente entre os tratamentos aos 47 DAS somente para a cultivar IPR Curió neste período os menores resultados foram observados nos tratamentos com tensiômetro a 0,15 e 0,20 m de profundidade, sem diferença estatística e média igual a 42,78; enquanto que no tratamento a 0,30 m houve incremento significativo de 28,83%. Nas avaliações ocorridas aos 62 DAS houve diferenças estatísticas entre as cultivares e tratamentos. A maior distinção para esta característica foi observada entre as cultivares, IAPAR 81 e IPR Curió. Considerando os tratamentos, a cultivar IAPAR 81 apresentou $\text{EUA}_{\text{extrínseca}}$ superior em 40,79% com tensiômetro a 0,15 m; comparativamente aos tratamentos a 0,20 e 0,30 m nestes dois últimos a média foi de 24,82 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$. As outras duas cultivares estudadas não apresentaram diferenças estatísticas para o mesmo período.

Aos 72 DAS foram observados os maiores incrementos para esta característica. As maiores diferenças ocorreram para as cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará no tratamento 0,15 m e sem diferença naqueles tratamentos com tensiômetro a 0,20 e 0,30 m. Para a cultivar IPR Curió os resultados indicaram maior $\text{EUA}_{\text{extrínseca}}$ na fase final de maturação fisiológica sem diferença significativa entre os tratamentos e semelhante ao comportamento da cultivar IAPAR 81. Possivelmente, o maior nível de estresse ocorreu com as plantas em estágio de maturação fisiológica o que pode ser uma característica relevante para manutenção do potencial produtivo.

Comprovando este comportamento ao analisar a Tabela 8, Figuras 12 e 14 nota-se, aos 72 DAS, redução da g_s ; porém com atividade fotossintética suficiente para continuidade dos processos de fixação de carbono e conversão da energia luminosa em fitomassa.

Ao final do ciclo de produção, 82 DAS, as cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará não apresentaram diferença estatística entre os tratamentos e média de 72,35 e 129,21 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$, respectivamente.

Tabela 12 - Eficiência no Uso da Água Extrínseca em plantas de feijão em função da profundidade do sensor e da

Fator de Variação	DAS	Cultivar	Profundidade do Tensiômetro	Interação	C.V. (%)
A/ g_s	20	2,97 ^{n.s.}	2,92 ^{n.s.}	1,53 ^{n.s.}	11,02
	35	1,09 ^{n.s.}	0,52 ^{n.s.}	1,68 ^{n.s.}	14,55
	47	3,12 ^{n.s.}	4,41*	2,04 ^{n.s.}	18,80
	62	6,43**	6,68**	0,73 ^{n.s.}	26,21
	72	5,75**	17,32**	10,40**	49,30
	82	5,64*	1,67 ^{n.s.}	1,61 ^{n.s.}	58,18
idade das plantas (DAS)					

* Significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade e ^{n.s.} não significativo.

Chaves et al. (2003) concluiu que, durante a fotossíntese plantas submetidas a maior disponibilidade hídrica fixam menor quantidade de carbono por unidade de água transpirada e grande parte dos vegetais apresentam tendências em aumentar a $\text{EUA}_{\text{extrínseca}}$, quando submetidos à condição de deficiência hídrica moderada, resultado de uma relação não linear entre a fotossíntese e a condutância estomática; ou seja, perda de água ocorrendo em maior intensidade do que o processo de inibição das taxas de fotossíntese.

Estudos conduzidos por Rosales et al. (2012) utilizando duas cultivares de feijão (Pinto Saltillo e Bayo Madero) em diferentes regimes de estresse hídrico relataram que a primeira cultivar, devido a maior $\text{EUA}_{\text{extrínseca}}$ e maior eficiência na fixação de CO_2 , resistiu melhor a restrição hídrica. Nesse estudo, os autores relataram que 13 dias após a total restrição hídrica, não houve diferença significativa na $\text{EUA}_{\text{extrínseca}}$, notadamente, as diferenças foram evidenciadas 22 dias após a restrição hídrica em comparação ao tratamento controle apresentando valores de 37,1; 60,2; 57,8 e de 35,9; 89,1 e 95,0 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$; para os tratamentos com irrigação próximo à capacidade de vaso e redução da disponibilidade hídrica em 50 e 25%, para cultivares Bayo Madero e Pinto Saltillo; respectivamente, ressaltando que,

os dois últimos tratamentos não apresentaram diferenças estatísticas entre si perdurando a diferença dos dois somente em relação ao tratamento controle. Nesse sentido, pode-se inferir que a cultivar Pinto Saltillo apresenta maior tolerância quando submetida a condições de seca por superar as limitações impostas pela restrição hídrica à difusão de CO_2 , provavelmente devido a maior eficiência na fixação de CO_2 (BOTA et al. 2004 e CHAVES, et al. 2009).

Figura 17 - Resultados da Eficiência do Uso da Água Extrínseca com tensiômetro posicionado a 0,15; 0,20 e 0,30 m em três cultivares. Mesma letra minúscula e maiúscula indicam médias sem diferença estatística entre cultivares e tratamentos, respectivamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados, pode-se concluir que:

As cultivares de feijão apresentaram resposta diferencial para as características produtivas e fisiológicas em função da disponibilidade hídrica ao longo do ciclo;

A maior produção de grãos ocorreu com posicionamento do tensiômetro a 0,20 m para a cultivar IAPAR 81;

Não foram observadas diferenças significativas na produção de grãos com tensiômetro a 0,20 e 0,30 m de profundidade para as cultivares IPR Tangará e IPR Curió;

As cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará apresentaram capacidade de recuperação das funções fisiológicas (fotossíntese, condutância estomática, transpiração e concentração interna de carbono no mesofilo foliar) após um período de redução extrema;

Não foram observadas alterações na eficiência da fotossíntese em função dos tratamentos realizados em nenhuma das cultivares avaliadas;

A maior produção de raízes foi observada nas cultivares IAPAR 81 e IPR Tangará e menor para cultivar IPR Curió;

A cultivar IPR Curió apresentou menor eficiência no uso da água;

A cultivar IAPAR 81 pode ser recomendada para locais sujeitos a deficiência hídrica, em contrapartida, a cultivar IPR Tangará e IPR Curió serão mais responsivas em sistemas de produção irrigados.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As transformações de caráter mundial e a necessidade de desenvolver cultivares cada vez mais tolerantes às alterações do ambiente é questão de sobrevivência da humanidade, principalmente quando se trata da obtenção de fontes de proteína com valor mais acessível à população.

A identificação de cultivares mais tolerantes à deficiência hídrica, em sua maioria, tem utilizado de metodologias baseadas na supressão total da irrigação realizada em diferentes fases fenológicas da cultura do feijão, desde 20 DAS até a fase de florescimento, dessa forma, não são bem caracterizadas a capacidade de recuperação dessas cultivares, haja vista, que cultivares com elevada capacidade de regeneração sem comprometimento da produtividade, são de grande valia, não só para a cultura do feijão mas para outras de interesse alimentar. Essa resposta à deficiência hídrica poderia ser diferente caso a metodologia fosse baseada na reidratação das cultivares e avaliação; sobretudo das características agrônômicas e fisiológicas.

Dessa forma, enfatizamos que os métodos utilizados para a presente pesquisa poderiam fazer parte dos programas de melhoramento genético, como forma de identificar por meio de estudos ligados a ecofisiologia vegetal e as relações solo, planta e atmosfera, cultivares promissoras e aquelas com capacidade de sobrevivência e produção econômica, inserido numa realidade cada vez mais sustentável e de restrição dos recursos hídricos. Também precisa ser melhor explorado os resultados da fluorescência da clorofila cada vez mais utilizada por pesquisadores como ferramenta principal na identificação de estresses da planta, o conhecimento dessa ferramenta poderá reduzir o tempo na obtenção de cultivares mais tolerantes à deficiência hídrica ou também ser fundamental na tomada de decisão por ocasião da definição de parentais para cruzamentos e obtenção de futuras cultivares. Complementarmente, são necessários estudos direcionados à restrição da irrigação e compactação do solo, haja vista, o grau crescente da utilização de máquinas agrícolas nas lavouras, tais resultados associados às relações hídricas poderão ter impacto sobre o zoneamento agrícola e definir com maior precisão as cultivares mais recomendadas para as regiões de cultivo.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; YONTS, C. D.; WRIGHT, J. L. Irrigation to maximize bean production and water use efficiency. In: Singh SP (Ed), Bean Research, Production, and Utilization. Proc Idaho Bean Workshop. University of Idaho, Moscow, p. 71–92, 2000.
- ALSINA, M.M.; SMART, D.R.; BAUERLE, T.; HERRALDE, F.; BIEL, C.; STOCKERT, C.; NEGRON, C.; SAVE, R. Seasonal changes of whole root system conductance by a drought-tolerant grape root system. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, p. 99–109, 2011.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS (ASABE). **Design and Installation of Microirrigation Systems**. Saint Joseph, 2008. 5p.
- ARUNYANARK, A.; JOGLOY, S.; AKKASAENG, C.; VORASOOT, N.; NAGESWARA RAO, R. C.; WRIGHT, G. C.; PATANOTHAI, A. Association between aflatoxin contamination and drought tolerance traits in peanut. **Field Crops Research**, Philadelphia, v. 114, n. 1, p. 14-22, 2009.
- ÁVILA, M. R.; BARIZÃO, D. A. O.; GOMES, E. P.; FEDRI, G.; ALBRECHT, L. P. Cultivo de feijoeiro no outono/inverno associado à aplicação de bioestimulante e adubo foliar na presença e ausência de irrigação. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.11, n.3, p. 221-230, 2010.
- BARBOSA, F. R.; GONZAGA, A. C. de O. **Informações técnicas para o cultivo do feijoeiro-comum na Região Central-Brasileira: 2012 – 2014**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2012. 247 p.
- BAKER, N. R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. **Annual review of plant biology**, Palo Alto, v. 59, n.1, p. 89–113, 2008.
- BAKER, N.; ROSENQVIST, E. Characteristics of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 55, p. 1607-1621, 2004.
- BOTA, J.; FLEXAS, J.; MEDRANO, H. Is photosynthesis limited by decreased Rubisco activity and RuBP content under progressive water stress? **New Phytologist**, Malden, v.162, p. 671 – 681, 2004.
- BOURGAULT, M.; MADRAMOOTOO, C. A.; WEBBER, H. A.; STULINA, G.; HORST, M. G.; SMITH, D. L. Effects of Deficit Irrigation and Salinity Stress on Common Bean (*Phaseolus Vulgaris* L.) and Mungbean (*Vigna Radiata* (L.) Wilczek) Grown in a Controlled Environment. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Malden, p. 262 - 272, 2010.
- BOYER, J. S.; SILK, W. K.; WATT, MICHELLE. Path of water for root growth. **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 37, n. 12, p. 1105, 2010.
- BRANDÃO, D.; FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R.; DALLACORT, R.; GARCIA, M. M. Effects of water stress on photosynthesis and evaporation in common bean plants. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, Helsinki, v. 11, n. 1, p. 383 - 388, 2013.

BUILES, V. H. R.; PORCH, T.G.; HARMSSEN, E. W. Genotypic differences in water use efficiency of common bean under drought stress. **Agronomy Journal**, Madison, v. 103, n. 4, p. 1206 - 1215, 2011.

CALVACHE, M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.; DOURADO-NETO, D. Deficit irrigation at different growth stages of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L., cv. Imbabello). **Science Agriculturae**, Cambridge, v. 54, p. 1–16, 1997.

CASTRILLO, M.; FERNANDEZ, D.; CALCAGNO, A.; TRUJILLO, I.; GUENNI, L. Responses of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase, protein content, and stomatal conductance to water deficit in maize, tomato, and bean. **Photosynthetica**, Berlin, v. 39, p.221 - 226, 2001.

CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A.; SESTARI, I. Manual de fisiologia vegetal: fisiologia de cultivos. 1. ed. São Paulo: Ceres. 2008 p.

CHAPMAN, N.; MILLER, A. J.; LINDSEY, K.; WHALLEY, W. R. Roots, water, and nutrient acquisition: let's get physical. **Trends in Plant Science**, Cambridge, v.17, n. 12, p. 1–10, 2012.

CHAVES, M. M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of Botany**, London, v. 103, n. 4, p. 551 – 560, 2009.

CHAVES, M. M.; MAROCO, J. P.; PEREIRA, J. S. Understanding plant responses to drought from the genes to the whole plant. **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 30, n. 3, p. 239 - 264, 2003.

COELHO, D. L. M.; AGOSTIM, E. A. T.; GUABERTO, L. M.; MACHADO NETO, N. B.; CUSTÓDIO, C. C. Estresse hídrico com diferentes osmóticos em sementes de feijão e expressão diferencial de proteínas durante a germinação. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 32, n. 3, p. 491–499, 2010.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Disponível em:

<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_08_07_08_59_54_boletim_graos_a_gosto_2014.pdf>. Acesso em: 09 ago. 2014.

COSTA, E. S.; BRESSAN, S. R.; OLIVEIRA, J. G. D.; CAMPOSTRINI, E.; PIMENTEL, C. Photochemical efficiency in bean plants (*Phaseolus vulgaris* L. and *Vigna unguiculata* L. Walp) during recovery from high temperature stress. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campo dos Goytacazes, v. 14, n. 2, p. 105–110, 2002.

DIAS, M. C.; BRÜGGEMANN, W. Limitations of photosynthesis in *Phaseolus vulgaris* under drought stress: gas exchange, chlorophyll fluorescence and Calvin cycle enzymes. **Photosynthetica**, Berlin, v. 48, n. 1, p. 96–102, 2010.

DIAS, M. C.; BRÜGGEMANN, W. Differential inhibition of photosynthesis under drought stress in *Flaveria* species with different degrees of development of the C4 syndrome. **Photosynthetica**, Berlin, v. 45, n. 1, p. 75-84, 2007.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

DO VALE, N. M.; BARILI, L. D.; ROZZETO, D. S.; STINGHIN, J. C.; COIMBRA, J. L. M.; GUIDOLIN, A. F.; KOOP, M. M. Avaliação para tolerância ao estresse hídrico em feijão. **Biotemas**, Florianópolis, v. 25, n. 3, p. 135-144, 2012.

DUTRA, A. T. B.; SILVA, E. N.; RODRIGUES, C. R. F. Temperaturas elevadas afetam a distribuição de íons em plantas de feijão caupi pré-tratadas com NaCl. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 4, p. 403-409, 2011.

EMBRAPA. **Manual de métodos e análise de solo**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2. ed. rev. atual. - Rio de Janeiro, 1997. 212p. (Embrapa CNPS. Documentos 1).

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. ver. atual. Brasília, 2013. 353p.

EMAM, Y.; SHEKOOFA, A.; SALEHI, F. JALALI, A. H. Water stress effects on two common bean cultivars with contrasting growth habits. **American-Eurasian Journal of Agriculture & Environment Science**, Dubai, v. 9, n. 5, p. 495-499, 2010.

FAVETTA, G. M.; BOTREL, T. A. Uniformidade de sistemas de irrigação localizada : validação de equações. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 2, p. 427-430, 2001.

FERRAZ, R. L. de S.; DE MELO, A. S.; SUASSUMA, J. F.; DE BRITO, M. E. B.; FERNANDES, P. D.; NUNES JÚNIOR, E. da S. Trocas gasosas e eficiência fotossintética em ecótipos de feijoeiro cultivados no semiárido. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiania, v. 42, n. 2, p. 181 - 188, 2012.

FIGUEIREDO, M. G. D.; FRIZZONE, J. A.; PITELLI, MARIUSA MOMENTI, REZENDE, R. Lâmina ótima de irrigação do feijoeiro, com restrição de água, em função do nível de aversão ao risco do produtor. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 1, p. 81-87, 2008.

FLEXAS, J.; BOTA, J.; GALMÉS, J.; MEDRANO, H.; RIBAS-CARBÓ, M. Keeping a positive carbon balance under adverse conditions: responses of photosynthesis and respiration to water stress. **Physiologia Plantarum**, Malden, v. 127, n. 3, p. 343-352, 2006.

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

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P.; PERES, F. S. C. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo vermelho. II - Intervalo hídrico ótimo e sistema radicular. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n.4, p. 805-818, 2009.

GASPAR, M. Aquaporinas : de canais de água a transportadores multifuncionais em plantas. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 481-491, 2011.

GHANBARI, A. A.; SHAKIBA, M. R.; TOORCHI, M.; CHOUKAN, R. Morpho-physiological response of common bean leaf to water deficit stress. **European Journal of Experimental Biology**, Coden, v.3, n. 1, p. 487 - 492, 2013.

GOMES, E. P.; BISCARO, G. A.; AVILA, M. R. Desempenho agrônômico do feijoeiro comum de terceira safra sob irrigação na região Noroeste do Paraná. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 3, p. 899–910, 2012.

HAYDON M. J.; BELL, L. J; WEBB, A. A. R. Interactions between plant circadian clocks and solute transport. **Journal of Experimental Botany**, Londrina, v. 62, n.1, p. 2333–2348, 2011.

HO, M.; ROSAS J.; BROWN, K.; LYNCH, J. P. Root architectural tradeoffs for water and phosphorus acquisition. **Functional Plant Biology**, Victoria, v. 32, n.8, p. 737–748, 2005.

HUVE, K.; BICHELLE, I.; RASULOV, B.; NIINEMETS, U. When it is too hot for photosynthesis: heat-induced instability of photosynthesis in relation to respiratory burst, cell permeability changes and H₂O₂ formation. **Plant, Cell and Environment**, Hoboken, v. 34, n.1, p. 113–126, 2011.

JADOSKI, S. O.; KLAR, A. E.; SALVADOR, E. D. Relações hídricas e fisiológicas em plantas de pimentão ao longo de um dia. **Ambiência**, Guarapuava, v. 1, n. 1, p. 11-19, 2005.

JAIMEZ, R. E. Seasonal variations in leaf gas exchange of plantain cv. ‘Hartón’ (Musa AAB) under different soil water conditions in a humid tropical region. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 104, n. 1, p. 79-89, 2005.

KING, J. Modelling Cereal Root Systems for Water and Nitrogen Capture: Towards an Economic Optimum. **Annals of Botany**, London, v. 91, n. 3, p. 383–390, 2003.

KNIPFER, T.; FRICKE, W. Water uptake by seminal and adventitious roots in relation to whole-plant water flow in barley (*Hordeum vulgare* L.). **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, n. 2, p. 717–733, 2011.

LANA, R. M. Q.; ZANÃO JÚNIOR, L. A.; CORREIA, N. M.; LANA, A. M. Q. Variabilidade entre genótipos de feijoeiro na eficiência no uso do fósforo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 778–784, 2006.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima Artes e Textos, 2000. 531p.

LAVRES JUNIOR, J.; MALAVOLTA, E.; NOGUEIRA, N. L.; MORAES, M. F.; REIS, A. R.; ROSSI, M. L.; CABRAL, C. P. Changes in anatomy and root cell ultrastructure of soybean genotypes under manganese stress. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 395–403, 2009.

LIAO, H.; RUBIO, G.; YAN X, CAO, A.; BROWN, K. M.; LYNCH, J. P. Effect of phosphorus availability on basal root shallowness in common bean. **Plant and Soil**, The Hague, v. 232, n. 1-2, p. 69–79, 2001.

LILLEY, J. M.; KIRKEGAARD, J. A. Benefits of increased soil exploration by wheat roots. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 122, n. 2, p. 118–130, 2011.

LIMA, A. A. F. **Respostas fisiológicas de cultivares de feijão [*Phaseolus vulgaris* L. e *Vigna unguiculata* (L.) Walph.] submetidas à deficiência hídrica: uma alternativa para a agricultura familiar do semi-árido sergipano**. 2008. 130 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Sergipe, Sergipe, 2008.

LUO, Q. Temperature thresholds and crop production: a review. *Climatic Change*, 109, p. 583 - 598, 2011.

LYNCH, J. P. Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: tools for future crops. **Plant Physiology**, Bethesda, v.156, n. 3, p. 1041–1049, 2011.

LYNCH, J. P.; BROWN, K. M. Topsoil foraging—an architectural adaptation of plants to low phosphorus availability. **Plant and Soil**, The Hague, v. 237, n.2, p. 225–237, 2001.

LYNCH, J. M.; LEIJ, F. Rhizosphere. **John Willey & Sons Ltd.**, p. 1–10, 2012.

MARQUES, L.; LEMOS, L. B.; ALEXANDRE, C.; CRUSCIOL, C.; FELTRAN, C. Sistema radicular de cultivares de feijão em resposta à calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 7, p. 701–707, 2004.

MAUREL, C. Aquaporins and water permeability of plant membranes. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**. Palo Alto, v. 48, n.1, p. 399–429, 1997.

MEDINA, C. L.; MACHADO, E. C.; GOMES, M. M. A. Condutância estomática, transpiração e fotossíntese em laranja 'Valência' sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**. Londrina, v. 11, n. 1, p. 29-34, 1999.

MOLINA, J. C.; MODA-CIRINO, V.; FONSECA JÚNIOR, N. S.; FARIA, R. T.; DESTRO, D. Response of common bean cultivars and lines to water stress. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Londrina, v. 1, n. 4, p. 363- 372, 2001.

MONTI, A.; ZATTA, A. Root distribution and soil moisture retrieval in perennial and annual energy crops in Northern Italy. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 132, n. 3-4, p. 252–259, 2009.

MUÑOZ-PEREA, C. G.; ALLEN, R. G.; WESTERMAN, D. T.; WRIGHT, J. L. Water use efficiency among dry bean landraces and cultivars in drought-stressed and non-stressed environments. **Euphytica**, Wageningen, v. 155, n. 3, p. 393 - 402, 2007.

NINO, E.TSIALTAS, J. T.; DORDAS, C. A.; PAPAOKOSTA, D. K. Effect of irrigation on the relationships between leaf gas exchange related traits and yield in dwarf dry bean grown under Mediterranean conditions. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 116, n. 1, p. 1–7, 2012.

OLIVEIRA, P. R.; CENTURION, J. P.; CENTURION, M. A. P. C.;JUNQUEIRA, H. B. F.; PEREIRA, S. P.; BÁRBARO JÚNIOR, L. S.; ROSSETTI, K. V. Qualidade Física de um latossolo Vermelho cultivado com soja submetido a níveis de compactação e irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 36, n.2, p. 587–597, 2012.

OLIVEIRA, R. B. de; SOUZA LIMA, S. de; REIS, E. F. dos; PEZZOPANE, E. M.; FARIA, A. da S. Níveis de déficit hídrico em diferentes estádios fenológicos do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Capixaba Precoce). **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, 16, n. 3, 343-350, 2008.

PARRY, M. A. J.; ANDRALOJC, P. J.; KHAN, S.; LEA, P. J.; KEYS, A. J. Rubisco activity: Effects of drought stress. **Annals of Botany**, London, v. 89, n.7, p. 833-839, 2002.

PÉRTILE, P. **Resíduo alcalino da indústria de celulose em solos ácidos e área degradada**. 2011. 106p. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages.

PIMENTEL, C.; OLIVEIRA, R. F.; RIBEIRO, R. V.; SANTOS, M. G.; MACHADO, E. C. Características fotossintéticas de *Phaseolus vulgaris* L. **Hoehnea**, São Paulo, v. 38, n. 2, p. 273 - 279, 2011.

POLANÍA, J. A.; RIVERA, M.; RICAURTE, J.; RAO, I. M. **Phenotyping Common Beans for Adaptation to Drought: Protocol for Greenhouse Evaluation**. International Center for Tropical Agriculture, 2009. 11 p.

PRADO, C. H. de A.; CASALI, C. A. **Fisiologia Vegetal Práticas em Relações Hídricas, Fotossíntese e Nutrição Mineral**. Barueri, SP: Manole, 2006. 448 p.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análises químicas para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285p.

RAZINGER, J.; DRINOVER, L.; SUSTAR-VOZLIC, J.; CREMOZNIK, B.; MECLIC, V.; CRENAK, A. Physiological response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) to drought stress. **Hmeljarski bilten / Hop Bulletin**, Slovenia, v. 17, n.1, p. 44 - 56, 2010.

RIBEIRO, R. V.; SANTOS, M. G. dos; MACHADO, E. C.; OLIVEIRA, R. F. de; ANGELOCCI, L. R.; PIMENTEL, C. Environmental effects on photosynthetic capacity of bean genotypes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 7, p. 615-623, 2004.

ROSALES, M. A.; OCAMPO, E.; RODRÍGUEZ-VALENTÍN, R.; OLVERA-CARRILLO, Y.; ACOSTA-GALLEGOS, J.; COVARRUBIAS, A. A. Physiological analysis of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars uncovers characteristics related to terminal drought resistance. **Plant Physiologist and Biochemistry**, v. 56, n.7, p. 24 - 34, 2012.

SANTANA, M. J. de.; SILVEIRA, A. L. DA.; CAMARGO, C. R.; BRAGA, J. C. Tensão de água no solo e doses de nitrogênio para a cultura do feijoeiro comum. **IRRIGA**, Botucatu, v. 14, n. 4, p. 518-532, 2009.

SANTOS, M. G.; RIBEIRO, R. V.; MACHADO, E. C.; PIMENTEL, C. Photosynthetic parameters and leaf water potential of five common bean genotypes unde mild water deficit. **Biologia Plantarum**, Praha, v. 53, n. 2, p. 229 - 236, 2009.

SAGLAM, A.; SARUHAN, N.; TERZI, K.; KADIOGLU, A. The relations between antioxidant enzymes and chlorophyll fluorescence parameters in common bean cultivars differing insensitivity to drought stress. **Russian Journal of Plant Physiology**, New York, v. 58, n. 1, p. 60 - 68, 2011.

SHIMAZAKI, K. I. et al. Light regulation of stomatal movement. **Annual Review of Plant Biology**, Gainesville, v. 58, n. 1, p. 219-247, 2007.

SILVA, E. O. **Manejo da fertirrigação em ambiente protegido visando o controle da salinidade do solo para a cultura da berinjela**, 2010. 79 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

SILVA, F. A. S. ASSISTAT 7.7. UFCG, Campina Grande, 2013.

SILVA, S. D. A.; MORAES, W. B.; SOUZA, G. S. D. Doses de cálcio no crescimento do feijoeiro cultivado em solução nutritiva, na presença de alumínio. **Idesia**, Arica, v. 29, n. 3, p. 53–58, 2011.

SIMSEK, M.; COMLEKCIOGLU, N.; OZTURK, I. The effects of the regulated deficit irrigation on yield and some yield components of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under semi-arid conditions. **African Journal of Biotechnology**, Grahamstown, v. 10, n. 20, p. 4057–4064, 2012.

SOUZA, G. M.; AIDAR, S. T.; GIAVENO, C. D.; OLIVEIRA, R. F. Drought stability in different common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Londrina, v. 3, n. 3, p. 203 - 208, 2003.

SOUZA, G. M.; VIANA, J. de O. F.; OLIVEIRA, R. F. de. Folhas assimétricas em feijoeiro sob deficiência hídrica exibem fotossíntese assimétrica. **Brazilian Journal Plant Physiology**, Londrina, v. 17, n. 2, 2005.

SUBBARAO, G. V.; JOHANSEN, C.; SLINKARD, A.E.; RAO, R.C.N.; SAXENA, N.P.; CHAUHAN, Y.S. Strategies for improving drought resistance in grain legumes. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Andhra Pradesh, v.14, n. 6, p. 469-523, 1995.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant Physiology**. 5.ed. Artmed, 2013.

THAMEUR, A.; LACHIHEB, B.; FERCHICHI, A. Drought effect on growth, gas exchange and yield, in two strains of local barley Ardhaoui, under water deficit conditions in southern Tunisia. **Journal of Environmental Management**, London, v. 113, p. 495–500, 2012.

UCAR, Y.; KADAYIFCI, A.; YARDIMCI, N. The effect of deficit irrigation on the grain yield of dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in semiarid regions. **Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria**, Madrid, v. 7, n. 2, p. 474–485, 2009.

WASSON, A. P.; RICHARDS, R. A.; CHATRATH, R. et al. Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water-limited wheat crops. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 63, n. 9, p. 3485–98, 2012.

WHITE, R. G.; KIRKEGAARD, J. A. The distribution and abundance of wheat roots in a dense, structured subsoil-implications for water uptake. **Plant, Cell and Environment**, Hoboken, v. 33, n. 2, p. 133–48, 2010.

YANG, T.; POOVAIAH, B. W. Calcium/calmodulin-mediated signal network in plants. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 8, n. 10, p. 505–12, 2003.