



MARINETE MARTINS DE SOUSA MONTEIRO

**DESEMPENHO PRODUTIVO E FISIOLÓGICO DO FEIJÃO-
CAUPI SOB DIFERENTES DENSIDADES DE PLANTAS E
REGIMES HÍDRICOS, EM SISTEMAS DE PLANTIO
CONVENCIONAL E DIRETO**

TERESINA - PIAUÍ

2018

MARINETE MARTINS DE SOUSA MONTEIRO

**DESEMPENHO PRODUTIVO E FISIOLÓGICO DO FEIJÃO-CAUPI SOB DIFERENTES
DENSIDADES DE PLANTAS E REGIMES HÍDRICOS, EM SISTEMAS DE PLANTIO
CONVENCIONAL E DIRETO**

Tese apresentada à Universidade Federal do Piauí, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - área de concentração Agricultura Tropical, para obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Edson Alves Bastos

Coorientador

Dr. Milton José Cardoso

TERESINA - PIAUÍ

2018

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Agrárias
Serviço de Processamento Técnico

M772d Monteiro, Marinete Martins de Sousa

Desempenho produtivo e fisiológico do feijão-caupi sob diferentes densidades de plantas e regimes hídricos, em sistemas de plantio convencional e direto / Marinete Martins de Sousa Monteiro – 2018.

82 f.: il.

Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2018.

Orientação: Prf. Dr. Edson Alves Bastos

1. *Vigna unguiculata* (L.) Walp., 2. Produtividade de grãos 3. Irrigação 4. Fotossíntese 5. Índice de área foliar I. Título

CDD 635.659 2

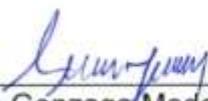
MARINETE MARTINS DE SOUSA MONTEIRO

**DESEMPENHO PRODUTIVO E FISIOLÓGICO DE FEIJÃO-CAUPI SOB
DIFERENTES DENSIDADES DE PLANTAS E REGIMES HÍDRICOS EM
SISTEMAS DE PLANTIO CONVENCIONAL E DIRETO**

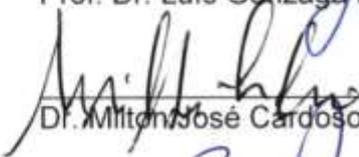
Tese apresentada à Universidade Federal do Piauí, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Agricultura Tropical, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

APROVADA em 27 de fevereiro de 2018.

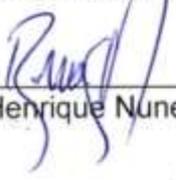
Comissão Julgadora:



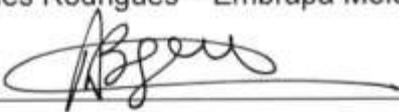
Prof. Dr. Luis Gonzaga Medeiros de Figueredo Júnior – UESPI



Dr. Milton José Cardoso – Embrapa Meio-Norte



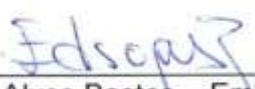
Dr. Braz Henrique Nunes Rodrigues – Embrapa Meio-Norte



Prof. Dr. Antônio Aécio de Carvalho Bezerra – CCA/UFPI



Prof. Dr. Everaldo Moreira da Silva – CPCE/UFPI



Dr. Edson Alves Bastos – Embrapa Meio-Norte
(Orientador)

TERESINA-PI

2018

À minha amada mãezinha Valdirene Martins de Sousa (*in memorian*) e meu querido pai Antônio Martins de Sousa;

Aos meus queridos irmãos: Maria Inês Marins de Sousa, José Martins de Sousa e Antônio Martins de Sousa Filho;

Aos meus queridos e amados sobrinhos Thiago Martins Costa (*in memorian*), Diego Pires Martins.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, força, sabedoria, direção e por ter concedido vitória em todas as lutas que precisei enfrentar.

A minha querida mãe Valdirene Martins de Sousa (*in memoriam*), exemplo de determinação e firmeza. Ela viveu com muita simplicidade, porém com um caráter inigualável. Mulher guerreira, zelosa e amorosa, companheira em todos os momentos.... obrigada por ter sido “a minha mãe”.... te amarei eternamente!!!

Ao Prof. Dr. Edson Alves Bastos, pela disposição na orientação, pela paciência, confiança, profissionalismo, conhecimentos transmitidos e amizade construída nesta caminhada.

Ao Prof. Dr. Milton José Cardoso, pela coorientação e por contribuir no aprendizado com sugestões importantes para este trabalho.

Ao Prof. Dr. Aderson Soares de Andrade Júnior, pelos momentos valiosos de ensinamentos, apoio e amizade, foi de grande proveito esse tempo de convivência na Embrapa Meio-Norte.

Ao Pesquisador Valdenir Queiroz Ribeiro pela preciosa contribuição no meu trabalho, pela paciência nos ensinamentos estatísticos.

Ao Prof. Dr. Lúcio Flavo Lopes Vasconcelos pelas importantes sugestões e contribuições no meu trabalho.

Ao Prof. Dr. Francisco de Alcântara Neto, pela amizade e apoio, incentivo sempre que precisei.

Ao Prof. Dr. Antônio Aécio de Carvalho Bezerra, pela disposição na orientação do Estágio Docência I e II, pelo apoio e amizade.

À Universidade Federal do Piauí e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Agricultura Tropical, pela oportunidade de me tornar Doutora.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo concedida para o desenvolvimento do trabalho.

À Embrapa Meio-Norte pelo apoio e auxílio na execução do meu experimento de Tese, em especial ao Mestre Diego Vasconcelos nas avaliações com o IRGA, ao chefe de campo Gustavo, aos técnicos: José de Anchieta Fontenele e Antônio Vieira Paz e ao pessoal de campo: Francisco das Chagas Souza, Edmar Rodrigues Machado, Manoel Alves da Silva, Pascoal Lourenço dos Santos, José Luiz Lima e Valmir Alves de Souza.

À todos os professores da Pós-Graduação em Agronomia - Agricultura Tropical da Universidade Federal do Piauí, Teresina, PI, pela dedicação, apoio e amizade.

À todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento, em especial a Dr^a. Prof^a. Ângela Celis de Almeida Lopes, Dr^a. Prof^a. Regina Lúcia Ferreira Gomes, Dr^a. Prof^a. Lidiane de Lima Feitoza, Dr^a. Prof^a. Melissa Oda Souza e Dr. Prof. Maurisrael de Moura Rocha, pela dedicação e amizade.

À Professora Dr^a. Pollyana Oliveira e família pela amizade e carinho com que me receberam durante a seleção do doutorado, muito obrigada!!!

À amiga Luciana Lima e família, presente de Deus na minha vida.

Aos amigos que Deus colocou em meu caminho Daiane Diniz e seu esposo Estevão Diniz, Dona France Diniz e seu esposo Salviano Souza por dividir bons momentos, ensinamentos, amizade....gosto muito de vocês!!!

Aos amigos da Pós-Graduação em Agronomia: Carlos Humberto, Fábio Nascimento, Gilson Portela, José Edmir Girão Filho, Herbert Ramos, João Rodrigues, Ricardo Sousa, Samara Raquel, Jayara Dayany, Marcos Vinícius, Arthur Coutinho, Valdeci Júnior, Josimar Soares, Tamnata Alixadre, pela amizade apoio e incentivo.

Aos amigos da Pós-Graduação em Genética e Melhoramento: Ubirajara Assunção, Laíse Passos, Gisele Luz e Jesuíno Martins pela amizade, apoio e momentos de descontração.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para realização deste trabalho...MUITO OBRIGADA!!!

RESUMO

O feijão-caupi tem sido cultivado sem muita tecnologia nas principais regiões produtoras do Brasil, ocasionando baixas produtividades de grãos, em comparação ao potencial da cultura. A utilização de irrigação, densidade de plantas e manejo adequado do solo são alternativas para aumentar os rendimentos dessa cultura. Objetivou-se avaliar os efeitos de regimes hídricos e densidades de plantas sobre os componentes de produção, produtividade de grãos e variáveis fisiológicas de uma variedade de feijão-caupi de porte ereto, BRS Itaim, em sistemas de cultivo convencional e direto. O experimento foi conduzido na Embrapa Meio Norte, Teresina-PI, de junho a agosto de 2016. O solo é um Argissolo Vermelho-Amarelo de textura média. Utilizou-se delineamento em blocos casualizados, em parcelas subdivididas, com quatro repetições. Os tratamentos foram cinco regimes hídricos nas parcelas (157,00 mm; 189,00 mm; 234,00 mm; 274,00 mm; 320,00 mm) e cinco densidades de plantas como subparcelas (12; 16; 20; 24 e 28 plantas m⁻²). As variáveis analisadas foram: número de vagens por planta, número de vagens por área, número de grãos por vagem, comprimento de vagens, produtividade de grãos, eficiência do uso da água e as trocas gasosas. No plantio convencional, a maior produtividade de grãos (1.166,36 kg ha⁻¹) foi obtida com uma lâmina de 320 mm associada à densidade de 16 a 28 plantas m⁻². No plantio direto, a maior produtividade de grãos (1.610,99 kg ha⁻¹) foi obtida com a lâmina de 274 mm associada à densidade de 27 a 28 plantas m⁻². A fotossíntese, condutância estomática e transpiração são afetadas significativamente pelos regimes hídricos, reduzindo seus valores sob déficit hídrico.

Palavras-chave: *Vigna unguiculata* (L.) Walp., produtividade de grãos, irrigação, fotossíntese, índice de área foliar.

ABSTRACT

Cowpea crop has been cultivated without technologies in the most regions of Brazil, resulting in low grain yields, when compared to the yield potential. The use of irrigation, adequate plant density and soil management are alternatives to increase this crop yield. The objective of this study was to evaluate the effects of water regimes and plant densities on the production components, grain yield, and physiological variables of a cowpea variety, BRS Itaim, under conventional and no-tillage systems. A randomized block design in a split-plot factorial, with four replications, was used. The treatments consisted of five water regimes in the plots (157.00 mm, 189.00 mm, 234.00 mm, 274.00 mm and 320.00 mm) and five plant densities as subplots (12; 16; 20; 24 and 28 plants m⁻²). The variables analyzed were: number of pods per plant, number of pods per area, number of grains per pod, pod length, grain yield, water use efficiency and gas exchange. Under conventional cultivated, the maximum grain yield (1,166.36 kg ha⁻¹) was obtained with 320 mm associated to the density in between 16 to 28 plants m⁻². Under no-tillage system, maximum grain yield (1,610, 99 kg ha⁻¹) was obtained with 274 mm associated with the density in between 27 to 28 plants m⁻². Photosynthesis, stomatal conductance and transpiration are significantly affected by water regimes, reducing their values under water deficit.

Key-words: *Vigna unguiculata* (L.) Walp., grain yield, irrigation, photosynthesis, leaf area index.

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Análise química do solo da área experimental. Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI, 2016..... | 34 |
| Tabela 2. Características físico-hídricas do solo da área experimental, Embrapa Meio Norte. Teresina, PI, 2016..... | 34 |
| Tabela 3. Valores de coeficiente de cultura para o feijão-caupi, em diferentes fases do ciclo, utilizados no experimento..... | 37 |
| Tabela 4. Resumo da análise de variância do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, para o número de vagens por planta (NVP), número de vagens por área (NVA), número de grãos por vagens (NGV), comprimento de vagens (CVg; cm), produtividade de grãos (PROD; kg ha ⁻¹) e eficiência do uso da água (EUA, kg ha ⁻¹ m ⁻³), em plantio convencional. Teresina, PI, 2016..... | 45 |
| Tabela 5. Resumo da análise de variância do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, para o número de vagens por planta (NVP), número de vagens por área (NVA), número de grãos por vagens (NGV), comprimento de vagens (CVg; cm), produtividade de grãos (PROD; kg ha ⁻¹) e eficiência do uso da água (EUA, kg ha ⁻¹ m ⁻³), em plantio direto. Teresina, PI, 2016..... | 45 |
| Tabela 6. Resumo da análise de variância do feijão-caupi cultivar BRS Itaim, para os índices de área foliar aos 45 dias (IAF45) e 52 dias (IAF52), após a semeadura das plantas, em plantio convencional e direto. Teresina, PI, 2016..... | 59 |
| Tabela 7. Resumo da análise de variância do feijão-caupi cultivar BRS Itaim, para à fotossíntese (A), condutância estomática (gs), transpiração (E) e eficiência instantânea do uso da água (EiUA) aos 55 dias após a semeadura, em plantio convencional. Teresina, PI, 2016..... | 60 |
| Tabela 8. Resumo da análise de variância do feijão-caupi cultivar BRS Itaim, para à fotossíntese (A), condutância estomática (gs), transpiração (E) e eficiência instantânea do uso da água (EiUA) aos 55 dias após a semeadura, em plantio direto. Teresina, PI, 2016..... | 60 |

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Variação das temperaturas do ar máxima (Tmax), média (Tméd) e mínima (Tmín) do ciclo do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim. Teresina, PI, 2016.....35
- Figura 2.** Medições de fotossíntese, condutância estomática, transpiração e eficiência instantânea do uso da água, com o analisador de gases infravermelho portátil (IRGA), modelo Li – 6400XT, em feijão-caupi, BRS Itaim, em plantio convencional e direto. Teresina, PI, 2016.....41
- Figura 3.** Variação do teor de água no solo para profundidade de 0,0 a 0,2 m, no feijão-caupi, BRS Itaim, para diferentes lâminas de irrigação aplicadas, em sistemas de plantio convencional (A) e direto (B). Teresina, PI, 2016.....43
- Figura 4.** Superfícies de resposta do número de vagens por planta do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, com a aplicação de níveis de irrigação e densidade de plantas em sistemas de plantio convencional (A) e direto (B). Dados transformados para \sqrt{x} . Teresina, PI, 2016.....46
- Figura 5.** Superfícies de resposta do número de vagens por área, do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, com a aplicação de níveis de irrigação e densidade de plantas em plantio convencional (A) e direto (B). Dados transformados para \sqrt{x} . Teresina, PI, 2016.....49
- Figura 6.** Superfícies de resposta do número de grãos por vagem, do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, com a aplicação de níveis de irrigação e densidade de plantas em plantio convencional (A) e direto (B). Dados transformados para \sqrt{x} . Teresina, PI, 2016.....51
- Figura 7.** Superfícies de resposta do comprimento de vagens por planta (cm), do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, com a aplicação de níveis de irrigação e densidade de plantas em sistemas de plantio convencional (A) e direto (B). Teresina, PI, 2016.....53
- Figura 8.** Superfície de resposta da produtividade de grãos ($\text{kg ha}^{-1} \text{ m}^{-3}$) do feijão-caupi cultivar BRS Itaim, com a aplicação de níveis de irrigação e densidade de plantas, em sistemas de plantio convencional (A) e direto (B). Teresina, PI, 2016.....55
- Figura 9.** Superfícies de resposta da eficiência do uso da água ($\text{kg ha}^{-1} \text{ m}^{-3}$), do feijão-caupi, BRS Itaim, com a aplicação de níveis de irrigação e densidade de plantas em plantio convencional (A) e direto (B). Teresina, PI, 2016.....58
- Figura 10.** Superfícies de resposta do índice de área foliar, do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, aos 45 DAS, com a aplicação de níveis de irrigação e densidade de plantas em sistemas de plantio convencional (A) e direto (B). Teresina, PI, 2016.....61

- Figura 11.** Superfícies de resposta do índice de área foliar, do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, aos 52 DAS, com a aplicação de níveis de irrigação e densidade de plantas em sistemas de plantio convencional (A) e direto (B). Teresina, PI, 2016.....63
- Figura 12.** Superfícies de resposta da fotossíntese ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), no feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, aos 55 DAS, com a aplicação de níveis de irrigação e densidade de plantas no plantio convencional. Teresina - PI, 2016.....65
- Figura 13.** Fotossíntese ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, aos 55 DAS, sob dois regimes hídricos (50 e 125% ETc), no plantio direto. Teresina-PI, 2016.....66
- Figura 14.** Condutância estomática ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, aos 55 DAS, sob dois regimes hídricos (50 e 125% ETc), no plantio convencional. Teresina, PI, 2016.....67
- Figura 15.** Condutância estomática ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, aos 55 DAS, sob dois regimes hídricos (50 e 125% ETc), no plantio direto. Teresina, PI, 2016.....68
- Figura 16.** Transpiração ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, aos 55 DAS, sob dois regimes hídricos (50 e 125% ETc), no plantio convencional. Teresina, PI, 2016.....69
- Figura 17.** Transpiração ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, aos 55 DAS, sob dois regimes hídricos (50 e 125% ETc), no plantio direto. Teresina, PI, 2016.....70
- Figura 18.** Superfícies de resposta da eficiência instantânea do uso da água do feijão-caupi ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), cultivar BRS Itaim, aos 55 DAS, com a aplicação de níveis de irrigação e densidade de plantas no plantio convencional. Teresina, PI, 2016.....71

SUMÁRIO

| | |
|--|------|
| RESUMO | vii |
| ABSTRACT | viii |
| LISTA DE TABELAS..... | ix |
| LISTA DE FIGURAS..... | x |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 14 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 17 |
| 2.1 Aspectos gerais da cultura do feijão-caupi..... | 17 |
| 2.2 Ecofisiologia..... | 18 |
| 2.3 Feijão-caupi e cultivar BRS Itaim | 19 |
| 2.4 Resposta do feijão-caupi a densidade de plantas | 19 |
| 2.5 Resposta do feijão-caupi a irrigação | 21 |
| 2.6 Sistema de plantio convencional e direto | 23 |
| 2.7 Eficiência do uso da água | 24 |
| 2.8 Variáveis fisiológicas do feijão-caupi | 26 |
| 2.8.1 Índice de área foliar | 26 |
| 2.8.2 Fotossíntese | 28 |
| 2.8.3 Condutância estomática..... | 30 |
| 2.8.4 Transpiração..... | 32 |
| 2.8.5 Eficiência instantânea do uso da água (EiUA)..... | 33 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS..... | 34 |
| 3.1 Caracterização da área experimental..... | 34 |
| 3.2 Dados climáticos..... | 35 |
| 3.3 Delineamento experimental | 35 |
| 3.4 Preparo do solo, adubação e semeadura | 36 |
| 3.5 Sistema de irrigação | 36 |
| 3.5.1 Regimes Hídricos..... | 37 |
| 3.5.2 Monitoramento do teor de água no solo | 38 |
| 3.6 Componentes de produção e produtividade de grãos | 38 |
| 3.7 Eficiência do uso de água | 39 |
| 3.8 Variáveis fisiológicas do feijão-caupi | 40 |
| 3.9 Análise estatística | 41 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 43 |
| 4.1 Conteúdo de água no solo | 43 |
| 4.2 Componentes de produção e produtividade de grãos | 44 |
| 4.3 Eficiência do uso da água (EUA)..... | 44 |

| | |
|--|----|
| 4.4 Variáveis fisiológicas do feijão-caupi..... | 59 |
| 4.4.1 Índice de área foliar | 60 |
| 4.4.2 Fotossíntese | 64 |
| 4.4.3 Condutância estomática..... | 66 |
| 4.4.4 Transpiração..... | 68 |
| 4.4.5 Eficiência instantânea do uso da água..... | 70 |
| 5 CONCLUSÕES..... | 73 |
| REFERÊNCIAS | 74 |

1 INTRODUÇÃO

O feijão-caupi [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] é uma cultura de grande importância socioeconômica para as regiões Nordeste e Norte do Brasil, pelo baixo custo de produção e por ser uma importante fonte de proteína para as populações carentes dessas regiões, gerando emprego e renda (FREIRE FILHO et al., 2005). Devido sua expansão em área e aumento no consumo, esta leguminosa nos últimos anos, tornou-se excelente alternativa de comercialização, para os agricultores familiares e empresariais.

No entanto, apesar de ser uma cultura melhorada geneticamente, no que se refere a porte e arquitetura moderna para cultivo mecanizado, seu cultivo ainda é realizado de forma rudimentar nas principais regiões produtoras do Brasil, onde a média de produtividade de grãos é baixa alcançando média nacional entre 400 a 500 kg ha⁻¹ em função do baixo nível tecnológico utilizado (ALVES et al., 2009). No estado do Piauí essa média de produtividade está em torno de 256 kg ha⁻¹ quando comparada ao potencial da cultura, estimado em torno de 6.000 kg ha⁻¹. Essa baixa produtividade de grãos pode ser justificada tanto pelo déficit hídrico quanto pelo baixo uso de tecnologias, como a falta de manejo adequado do solo, uso inadequado de densidade de plantas e à falta de manejo de irrigação (FREIRE FILHO et al., 2005).

Trabalhos avaliando a densidade de plantas em feijão-caupi, têm sido desenvolvidos por vários autores no Brasil (BEZERRA et al., 2012; BEZERRA et al. 2014; CARDOSO et al., 2015). A densidade de plantas influencia bastante no rendimento de grãos do feijão-caupi, pois altera sensivelmente o número de vagens por planta ou por área, que é o principal componente de produção (CARDOSO et al., 2005). Em cultivares de porte semiprostrado, Cardoso et al. (2015) obtiveram respostas quadráticas para o número de vagem por área, alcançando valores máximos de 110,2; 92,6 e 92,9 vagens m⁻², respectivamente, nas densidades 12,8; 13,0 e 13,3 plantas m⁻¹ (BRS Aracê).

Dessa forma, é muito importante a definição de uma população de plantas adequada, principalmente considerando a diversidade de portes e de sistemas de cultivo de feijão-caupi. Normalmente, para variedades de porte ereto recomenda-se um maior número de plantas por área (entre 180 e 220 mil plantas por hectare),

quando comparado a variedades de porte semiprostrado ou prostrado (entre 120 e 140 mil plantas por hectare).

A irrigação, por sua vez, quando utilizada de forma adequada, promove aumentos tanto na produtividade como na qualidade de grãos do feijão-caupi, conforme relatado por Locatelli et al. (2014), Oliveira et al. (2011), Silva et al. (2013) e Silva et al. (2016). Em Rorainópolis, RR, os 20 genótipos avaliados por Silva et al. (2016) sob irrigação alcançaram uma produtividade média de grãos 27% superior em relação aos mesmos genótipos sob sequeiro. Essas diferenças podem ser dobradas ou triplicadas, caso ocorra deficiência hídrica no cultivo de sequeiro.

A presença de palhada na superfície do solo durante o desenvolvimento do feijão-caupi aliada ao manejo de irrigação é uma ferramenta de fundamental importância na agricultura irrigada promovendo redução na evaporação da água (LOCATELLI et al. 2014). Os resíduos culturais sobre o solo atuam alterando a relação solo-água, diminuindo a taxa de transpiração das culturas, principalmente nas fases em que o dossel das mesmas não cobre totalmente o solo, ocasionando em redução na frequência de irrigação e economia nos custos de operação do sistema (STONE et al., 2006).

O sistema de plantio direto (SPD) pode ser visto como uma alternativa vantajosa para o produtor na obtenção de melhores produtividades, quando comparado ao sistema convencional, pois a palhada sobre a superfície do solo no sistema plantio direto (SPD), reduz a evaporação da água favorecendo desta maneira maior economia na utilização da água nesse sistema em relação ao solo descoberto.

No entanto, são escassos os trabalhos na literatura mostrando a produtividade do feijão-caupi em plantio direto submetido a diferentes densidades populacionais, o que torna relevante a realização desta pesquisa. Este sistema de cultivo reduz os efeitos drásticos das condições climáticas desfavoráveis ao desenvolvimento da cultura (SIMIDU et al., 2010), como o déficit hídrico e o estresse térmico. Os resíduos culturais atuam como agente isolante, impedindo oscilações bruscas da temperatura do solo e contribuindo para a menor evaporação da água armazenada no solo, com melhor aproveitamento da água pelas plantas (BIZARI et al., 2009).

O rendimento produtivo de uma planta depende da quantidade de radiação solar fotossinteticamente ativa absorvida pelas folhas e da eficiência com que a planta converte essa energia radiante em fotoassimilados. A eficiência fotossintética

é, principalmente, uma função direta da densidade de plantas, onde o excesso de plantas pode promover autosombreamento do dossel e resultar no decréscimo da taxa fotossintética e, conseqüentemente, da produtividade do feijão-caupi. Desta forma, para uma variedade de feijão-caupi expressar seu máximo desempenho fisiológico e produtivo é necessário considerar a densidade de plantas adequada, como também a lâmina de irrigação e o sistema de cultivo utilizado.

Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi avaliar os efeitos de regimes hídricos e densidades de plantas sobre os componentes de produção, produtividade de grãos e variáveis fisiológicas de uma variedade de feijão-caupi de porte ereto, BRS Itaim, em sistemas de cultivo convencional e direto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos gerais da cultura do feijão-caupi

O feijão-caupi [*Vigna unguiculata* (L.) Walp], conhecido também por macassar ou feijão-de-corda é uma dicotiledônea que pertence à ordem *Fabales*, família *Fabacea*, subfamília *Faboideae*, tribo *Phaseoleae*, subtribo *Phaseolinae*, gênero *Vigna*, espécie *Vigna unguiculata* (L.) Walp. (FREIRE FILHO et al., 2005). É uma leguminosa de ampla distribuição geográfica nas regiões tropicais, devido às condições edafoclimáticas semelhantes ao seu provável local de origem, a África. No Brasil apresenta-se como cultura de grande importância para a população do Nordeste, principalmente, das áreas semiáridas, onde representa um dos principais componentes da dieta alimentar das famílias, fixando a mão de obra no campo e gerando emprego e renda (FREIRE FILHO et al., 2011; COELHO et al., 2013).

No entanto, mesmo adaptada às condições edafoclimáticas do Nordeste, esta leguminosa possui produtividade de grãos média considerada baixa (FREIRE FILHO et al., 2011). Essa baixa produtividade é resultado de vários fatores, como o uso de sementes não melhoradas, do cultivo em solos de baixa fertilidade e ocorrência de precipitações irregulares (NASCIMENTO et al., 2011), sendo a deficiência hídrica o principal fator de redução da produtividade de grãos do feijão-caupi (MENDES et al., 2007). Esse efeito é mais pronunciado quando o cultivo é realizado em sistema de sequeiro (cultivo na época das chuvas), responsável por mais de 70% da produção anual (FREITAS, 2012).

A produção de feijão-caupi, no Nordeste brasileiro apresenta-se historicamente com 1,2 milhão de hectares, a região Norte com 55,8 mil hectares (FREITAS, 2012) e na região Centro-Oeste passou a ser cultivado a partir de 2006, onde a produção provém, principalmente, de médios e grandes empresários em cultivos de larga escala, altamente tecnificada devido às características favoráveis ao cultivo mecanizado (FREIRE FILHO et al., 2011). O Estado do Piauí possui a maior área plantada com feijão-caupi no território brasileiro, apresentando 211,5 mil hectares (CONAB, 2016). No Brasil, o feijão-caupi contribui com 35,6% da área plantada e 15% da produção total de feijão (feijão-caupi + feijão-comum). Entretanto, a produtividade média no Brasil é de 400 a 500 kg ha⁻¹, muito abaixo do seu potencial produtivo estimado em 6.000 kg ha⁻¹ (ALVES et al., 2009).

Apesar da baixa produtividade de grãos, o feijão-caupi apresenta-se como nova opção de cultura de entressafra a ser explorada em uma diversidade de sistemas de produção e níveis tecnológicos, podendo alcançar produtividades de grãos superiores a 2.500 kg ha⁻¹ e valores ainda mais elevados, principalmente em regiões de clima favorável e com uso de cultivares de elevado potencial produtivo adaptada ao local de cultivo (FREIRE FILHO et al., 2011).

2.2 Ecofisiologia

O conhecimento dos aspectos ecofisiológicos de uma cultura é importante na busca de melhor desempenho produtivo. Desta forma, conhecer os elementos de clima como a precipitação, a temperatura do ar e do solo e radiação solar torna-se necessário para um manejo mais adequado à cultura do feijão-caupi. Com relação à necessidade hídrica para se obter o máximo rendimento, é necessário o suprimento de água entre 300 mm a 450 mm durante o ciclo e dependendo das variações edafoclimáticas (NÓBREGA et al., 2001).

No que se refere à temperatura, o ideal para se alcançar um bom desenvolvimento da cultura do feijão-caupi está na faixa de 20° a 30°C, já que, temperaturas acima destes valores poderão prejudicar o seu florescimento. Temperaturas elevadas durante o dia podem prejudicar a fotossíntese e, o crescimento e desenvolvimento do feijão-caupi, comprometendo seu processo reprodutivo devido ao abortamento de flores, ao vingamento e à retenção final de vagens, reduzindo, assim, o número de grãos por vagem e a produtividade de grãos (CARDOSO et al., 2005). Quando a temperatura do ar atinge valor superior a 37°C provoca a abscisão de flores e de vagens (OLIVEIRA et al., 2017).

Os diferentes graus de luminosidade provocam mudanças na morfofisiologia das plantas demonstrando que a qualidade da luz influencia no crescimento e desenvolvimento. É classificado como espécie de ciclo C₃ pois pertence ao grupo que fixa CO₂ pelo ciclo de Calvin-Benson, e os primeiros produtos estáveis da fotossíntese são trioses denominadas ácido 3-fosfoglicérico e glicerato, constituídas por três átomos de carbono (TAIZ; ZEIGER, 2013).

2.3 Feijão-caupi e cultivar BRS Itaim

Alguns trabalhos têm sido desenvolvidos por melhoristas com relação à seleção de genótipos com arquitetura de planta adequada para serem utilizadas com o cultivo mecanizado no intuito de disponibilizar cultivares mais eretas, com ramos mais curtos e mais resistentes ao acamamento, como a BRS Guariba e BRS Novaera, BRS Tumucumaque de porte semiereto, lançadas em 2004 e 2007 respectivamente e BRS Itaim, de porte ereto, lançada em 2009 (EMBRAPA, 2009).

A cultivar BRS Itaim corresponde a linhagem MNC04-786B-87-2, obtida do cruzamento MNC04-786, realizado na Embrapa Meio-Norte em 2004, indicado para cultivo na região Norte, nos estados de Roraima, Pará e Tocantins; na região Nordeste, no Piauí, Maranhão e Sergipe e na região Centro-Oeste, no Mato Grosso (EMBRAPA, 2009).

Dentre suas características destacam-se: hábito de crescimento determinado, porte ereto, alta resistência ao acamamento, flores brancas com leve pigmentação roxa e semente branca com halo preto, número médio de dias para a floração em torno de 35 dias e ciclo de 60 a 65 dias. Possui comprimento médio da vagem de 16 cm, e média de NGV nove, massa média de 100 sementes de 23 gramas. Os grãos são do tipo fradinho, brancos, com um grande halo preto e tegumento rugoso, contendo 21,5% de proteína, 48,8 mg kg⁻¹ de ferro e 43,4 mg kg⁻¹ de zinco (EMBRAPA, 2009).

2.4 Resposta do feijão-caupi a densidade de plantas

O número de plantas por unidade de área é um fator importante, pois tem efeito direto no rendimento de grãos. Para o feijão-caupi, a população de plantas ideal varia em função de fatores da planta, como o porte, hábito de crescimento e arquitetura, bem como fatores do solo, como a fertilidade, a textura e o sistema de manejo empregado. Para qualquer cultura, a densidade de plantas deve ser uma ferramenta aliada na obtenção da máxima produção econômica (HENDERSON; JOHNSON; SCHNEITER, 2000), pois o excesso ou escassez de plantas por área apresenta-se como uma das principais causas da baixa produtividade do feijão-caupi (CARDOSO; MELO; LIMA, 2005; BEZERRA et al., 2008).

A utilização de altas densidades de plantas pode proporcionar boa interceptação da radiação solar, todavia com baixa qualidade na distribuição ao longo do dossel. Enquanto que baixas densidades comprometem a capacidade de interceptação da radiação solar e, conseqüentemente, o aproveitamento no uso da mesma. De acordo com Shimada et al. (2000) aumentando-se a densidade de plantas, se reduz a produção por planta; entretanto, há um aumento na produção por área, demonstrando que a produção por unidade de área é máxima quando a densidade de plantas utilizada é ideal. Portanto, mesmo com uma menor produção por planta, a produtividade de grãos pode ser elevada em decorrência do maior número de plantas na área. Em virtude disso, há necessidade, de se definir densidades de plantas adequadas para se otimizar a produtividade de grãos.

Quando se compara os sistemas de cultivos, observa que, tanto nos sistemas tradicionais quanto nos mais tecnificados, é necessário ter informações acerca das alterações nos componentes de produção e na morfofisiologia das variedades modernas de feijão-caupi, quando cultivadas em diferentes densidades de plantas (BEZERRA et al., 2012). Em trabalhos realizados por Cardoso, Ribeiro e Melo (2013), avaliando o efeito de densidades de plantas no feijão-caupi em variedades de porte ereto (E), semi-ereto (SE) e semi-prostrado (SP) nas condições de solo e clima do Piauí, os autores obtiveram valores de rendimentos de grãos das cultivares de portes E e SE de 2.114 kg ha⁻¹ (18 plantas m⁻²) e 2.582 kg ha⁻¹ (17 plantas m⁻²), respectivamente, e para a variedade de porte SP, 1.282 kg ha⁻² com 11 plantas m⁻².

Santos e Araújo (2000), avaliando a produtividade de grãos e morfologia de genótipos de feijão-caupi de diferentes portes, sob diferentes densidades de plantas em sistemas de cultivo irrigado e de sequeiro, no município de Petrolina, obtiveram produtividades de grãos de 1.126 kg ha⁻¹ e 2.330 kg ha⁻¹ para o genótipo IT 86D-472 (porte semi-ereto) com densidades de 203.051 plantas ha⁻¹ e 207.328 plantas ha⁻¹, nos sistemas sequeiro e irrigado, respectivamente. Para o genótipo Epace 10 (porte semi-prostrado) as produtividades de grãos nos ambientes de sequeiro e irrigado foram de 1.048 kg ha⁻¹ e 2.694 kg ha⁻¹ nas densidades de 154.413 plantas ha⁻¹ e 182.416 plantas ha⁻¹, respectivamente.

Bezerra et al. (2012) avaliaram o comportamento morfoagronômico de feijão-caupi, cultivar BRS Guariba, sob diferentes densidades de plantas, em Alvorada do Gurguéia, PI, sob regime irrigado, observaram decréscimos lineares no número de

vagens por planta, ou seja, com o aumento das densidades de 10, 30 e 50 plantas m^{-2} , apresentaram valores de 11,6; 4,4; 4,2, vagens por planta, respectivamente.

Oliveira et al. (2015), estudando a interação de níveis de água e densidade de plantas no crescimento e produtividade de grãos do feijão-caupi em Teresina-PI, constataram que houve significância na interação entre os níveis de irrigação e as densidades de plantas nos componentes de produção: número de vagens por planta, peso de vagens, comprimento de vagem, peso de cem grãos e produtividade de grãos. E que a produtividade máxima de grãos foi de 1.668,86 $kg\ ha^{-1}$, obtido com a lâmina de 390,88 mm em conjunto com a densidade de 241.000 plantas ha^{-1} , com a cultivar BRS Itaim.

2.5 Resposta do feijão-caupi à irrigação

A prática da irrigação é uma ferramenta capaz de promover uma produção agrícola com maior segurança, principalmente em regiões tropicais de clima quente e seco, como o Nordeste brasileiro, onde há ocorrência do déficit hídrico para as plantas devido à taxa de evapotranspiração exceder a taxa de precipitação durante a maior parte do ano (HOLANDA et al., 2010). Desta forma, a finalidade básica da irrigação é disponibilizar água às diversas culturas suprimindo as necessidades hídricas durante todo o ciclo e, principalmente, promovendo condições para o alcance de maiores produtividades, além de, favorecer produtos com maior qualidade.

O consumo hídrico do feijão-caupi aumenta progressivamente do início da germinação até atingir o máximo nas fases de floração e enchimento de vagens, diminuindo o consumo no início da maturação (NÓBREGA et al., 2001), variando de 300 a 450 mm/ciclo bem distribuídos nos diferentes estádios de desenvolvimento, sendo dependente da cultivar e das condições edafoclimáticas locais (NASCIMENTO, 2009). De acordo com Bernardo (2008), a quantidade de água necessária às culturas está relacionada à espécie cultivada, à produtividade de grãos desejada, ao local de cultivo, ao estágio de desenvolvimento da cultura, ao tipo de solo e à época de plantio.

Para o manejo adequado da cultura do feijão-caupi, quando se visa alta produtividade de grãos, é importante saber seu potencial de resposta aos níveis de déficit hídrico, como também a relação entre o consumo de água e a produtividade

de grãos (NASCIMENTO et al., 2004). Os mesmos autores mostraram que o desempenho do crescimento de plantas e de produção do feijão-caupi, cv. IPA 206 foi significativamente influenciado pelos níveis de deficiência hídrica aplicada ao solo.

Tagliaferre et al. (2013) estudando os efeitos de lâminas de irrigação e níveis de adubação nitrogenada em feijão-caupi inoculado, constataram que não houve interação significativa entre os fatores para as características avaliadas. Porém, analisando a variável número de grãos por vagem em decorrência das lâminas de irrigação, observaram efeito quadrático para essa característica e, de acordo com o modelo, o número máximo de grãos por vagem (11,96) seria obtido com uma lâmina de irrigação de 332,63 mm.

Em trabalhos realizados por Andrade Júnior et al. (2002), analisando níveis de irrigação na cultura do feijão-caupi, em Parnaíba, PI, observou-se que, para as variáveis número de vagens por planta, número de grãos por vagem, peso de cem grãos, peso de grãos e eficiência do uso da água em função das lâminas de irrigação aplicadas, apresentaram comportamento linear e quadrático.

Locatelli et al. (2014), avaliando a interação de diferentes lâminas de irrigação com diferentes cultivares de feijão-caupi no cerrado de Roraima, verificaram que para o cultivar BRS Pajeú a produtividade de grãos secos teve influência das lâminas de irrigação, obtendo uma média de 1.495,07 kg ha⁻¹. As cultivares BRS Guariba e BRS Novaera também apresentaram efeito significativo das lâminas de irrigação, atingindo a máxima eficiência técnica para as produtividades de grãos de 1.275,19 e 1.504,98 kg ha⁻¹ com as lâminas de 157,27 mm (74,3% da ETo) e 199 mm (94,02% da ETo), respectivamente.

Na agricultura irrigada, a presença de palhada na superfície do solo em quantidade adequada é muito importante, pois altera a relação solo-água, reduzindo a taxa de evapotranspiração das culturas, principalmente nos estádios em que o dossel destas ainda não cobre totalmente o solo, tendo como consequência a redução na frequência de irrigação e economia nos custos de operação do sistema (STONE et al., 2006).

Freitas et al. (2013), estudando a produção de feijão-caupi sob efeito de veranico nos sistemas de plantio direto e convencional em um Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico, na região de Mossoró, RN, verificaram significância na interação entre os sistemas de plantio e os períodos de veranico para os componentes de produção: comprimento de vagem, número de grãos por vagem, número de vagens

por planta e rendimento de grãos. No menor período de veranico estudado (dois dias), condição semelhante à da ausência de déficit hídrico, verificou-se diferença expressiva na produtividade de grãos entre os sistemas de plantio direto e convencional, com produtividades de grãos de 2.234,16 e 1.705,00 kg ha⁻¹, respectivamente.

Souza et al. (2017), avaliando a produtividade de grãos do feijão-caupi sob regimes hídricos em Castanhal, Pará, observaram que sob deficiência hídrica, ocorreu redução de 72% e 41% do rendimento nos anos de 2012 e 2013, respectivamente.

2.6 Sistemas de plantio convencional e direto

O sistema de plantio convencional é uma prática bastante utilizada por produtores de grãos nas diferentes regiões do Brasil, o que tem contribuído para a degradação do solo, disseminação de doenças e redução na produtividade de grãos. O uso de tecnologia como o sistema plantio direto, com uso de palhada sobre o solo pode representar opção viável para reduzir os impactos no uso intensivo do solo e favorecer melhorias nas propriedades química, física e biológica do solo (SILVA et al., 2011).

Para o manejo adequado da cultura do feijão-caupi visando à maior produtividade de grãos, é importante conhecer a capacidade de resposta aos níveis de déficit hídrico (NASCIMENTO; PEDROSA; TAVARES SOBRINHO, 2004), bem como formas de manejo que possam minimizar os danos provocados por esse problema, sendo uma dessas formas a utilização do plantio direto. Os cultivos tecnificados exigem cultivares com alto potencial de rendimento de grãos e arquitetura de plantas adequadas aos cultivos e à colheita mecanizada. E nas regiões produtoras, principalmente no Nordeste brasileiro, o plantio do feijão-caupi vem sendo realizado em grandes áreas, como cultura principal ou de safrinha, e, em especial, no cerrado piauiense, onde se observam aumentos significativos da área plantada (BEZERRA et al., 2012).

Bizari et al. (2011) afirmaram que para a agricultura irrigada mostrar-se mais eficiente é necessário o uso de sistemas de manejo conservacionistas como o (SPD), que contribui para o aumento de produtividade e redução da lâmina de água aplicada em cultivos agrícolas. O manejo adequado da irrigação irá favorecer maior

economia da água, energia, além de aumentar a produtividade da cultura e promover melhorias na qualidade do produto (AZEVEDO et al., 2011). Além disso, a disponibilidade de água é um dos fatores ambientais que mais interfere na produtividade de grãos das diversas culturas.

Em trabalho realizado por Stone (2005) com a cultura do feijoeiro comum irrigado em sistemas plantio direto e convencional, em Guaíra, SP, foram encontrados valores do consumo de água pela cultura de 254 mm e 343 mm, respectivamente, mostrando a importância do sistema plantio direto na diminuição do número de irrigações e no aumento da disponibilidade de água para as plantas nesse sistema. O sistema plantio direto, em função da cobertura dos resíduos vegetais sobre a superfície do solo, promove menor gasto de água na cultura do feijoeiro (LI et al., 2008; SHEN et al., 2012).

O sistema de plantio direto pode ser visto como uma alternativa vantajosa para o produtor na obtenção de melhores produtividades de grãos, quando comparado ao sistema convencional.

2.7 Eficiência do uso da água (EUA)

A eficiência do uso da água pela cultura em relação ao rendimento obtido é um parâmetro de grande importância, principalmente em locais em que a atividade de produção de feijão-caupi é diretamente determinada pela prática da irrigação, refletindo na rentabilidade e na eficiência da produção. A utilização de indicadores da eficiência do uso de água é uma das formas de se analisar a resposta dos cultivos às diferentes condições de disponibilidade de água, pois relaciona a produção de biomassa seca ou a produção comercial com a quantidade de água aplicada ou evapotranspirada pela cultura (DUTRA et al., 2015).

Para as cultivares de feijão-caupi, a eficiência do uso da água torna-se necessário como estratégia de manejo, possibilitando a redução na lâmina de água aplicada nas fases fenológicas da cultura mais susceptíveis ao déficit hídrico, conseqüentemente, diminuindo os gastos com a quantidade de água aplicada, sem comprometer a produção. Angus e Herwaarden (2001) afirmam que o conhecimento da eficiência do uso da água é uma ferramenta de fundamental importância para avaliar se a produção está sendo limitada pelo suprimento de água ou por outros fatores.

Uma maneira de analisar as respostas dos cultivos às condições variadas de disponibilidade de água é por meio do uso eficiente de água, que relaciona a produção comercial, com a quantidade de água aplicada e, ou evapotranspirada (LIU; STÜTZEL, 2004; PUPPALA et al., 2005). Assim, a irrigação deficitária visa aumentar a eficiência de uso da água e a eficiência de aplicação e armazenagem (PHENE, 1989), pressupondo que uma baixa disponibilidade de água implica na limitação à produção agrícola.

A eficiência do uso da água indica que, apesar do potencial que as cultivares têm de alcançar produtividades maiores com lâminas maiores, tais lâminas devem ser recomendadas economicamente somente se a água não for um fator limitante à produção agrícola.

Ramos et al. (2013), avaliando o efeito de diferentes lâminas de irrigação no cultivo de feijão-caupi, observaram máxima eficiência de uso da água com valores de 4,20 e 4,29 kg ha mm⁻³, obtidas com as lâminas de irrigação de 326 e 279 mm, para as cultivares BRS Guariba e BRS Paraguaçu, respectivamente.

De acordo com Locatelli et al. (2014), a disponibilidade de água é fator relevante a ser considerado quando se pretendem ganhos na produtividade de grãos do feijão-caupi, o que pode ser obtido com um manejo adequado que proporcione a maximização da eficiência do uso da água.

Para Sousa et al. (2000), a distribuição da água e a manutenção de níveis ótimos de umidade no solo durante todo o ciclo da cultura, reduzem as perdas de água por drenagem e os períodos de estresse hídrico da cultura, o que aumenta a eficiência de uso da água.

Andrade Júnior et al. (2002), avaliando a eficiência do uso da água para o feijão-caupi, observaram resposta quadrática, com EUA de 0,661 kg ha⁻¹ m⁻³ na aplicação das lâminas 306,3 mm. Oliveira (2013), avaliando densidade populacional do feijão-caupi sob níveis de irrigação, constatou EUA de 4,78 kg ha⁻¹ m⁻³ na lâmina de 342,97 mm e a densidade populacional de 23,3 plantas m⁻².

Araújo (2014), analisando estratégias de irrigação no feijão-caupi no litoral cearense, observou que os menores valores de eficiência do uso de água foram aos tratamentos submetidos a déficit hídrico sendo, explicado, principalmente, por esses tratamentos apresentarem baixos valores de produtividade.

2.8 Variáveis fisiológicas do feijão-caupi

2.8.1 Índice de área foliar (IAF)

O Índice de área foliar (IAF) é uma medida adimensional que indica a quantidade de material foliar em um ecossistema, que atribui controles importantes sobre a fotossíntese, respiração, interceptação de chuva e outros processos que relaciona a planta às condições edafoclimáticas. Neste sentido, é uma variável chave em muitos modelos que descrevem as interações vegetação-atmosfera, particularmente em relação aos ciclos de carbono e água. Qualquer alteração no índice de área foliar do dossel (por geada, tempestade, desfolha, déficit ou excesso hídrico e densidade populacional) é acompanhada de modificações no rendimento produtivo das culturas (GCOS, 2004).

De acordo com Favarim et al. (2002), o índice de área foliar é a relação entre a área foliar e a área do terreno ocupada pela cultura, constituindo um parâmetro importante para explicar a produtividade alcançada por determinada cultura. Neste sentido, é possível utilizar este recurso em cultivos de sequeiro e irrigado para avaliar o crescimento e o desenvolvimento das plantas.

Diversos métodos podem ser empregados na determinação do índice de área foliar de uma planta, podendo-se utilizar métodos destrutivos onde a folha ou parte da estrutura da planta é retirada para se realizar a quantificação. Entretanto, o uso de métodos mais simples, rápidos e não destrutivos para estimar a área foliar com precisão torna-se necessário para avaliar o crescimento das plantas nas condições de campo (CUNHA et al., 2010), haja vista que não é necessário haver redução do stand de plantas inicial.

Em geral, a área foliar se apresenta como importantíssimo parâmetro na determinação da capacidade fotossintética, da densidade ótima de plantio, de relação solo-água-planta ou em investigações sobre nutrição de várias culturas (BASTOS et al., 2012). A fotossíntese depende da área foliar, e, a produtividade de uma cultura será tanto maior quanto mais próximo for do índice de área foliar máximo potencial e quanto mais tempo permanecer ativa, retardando a senescência (FIGUEREDO JÚNIOR et al., 2005). Desta forma, o funcionamento dos estômatos

controla a absorção do CO₂ e a área foliar determina a interceptação de luz, influenciando a produtividade das plantas.

Para as condições tropicais, o máximo da interceptação de luz observa-se no feijão-caupi, com um IAF de 3, nas condições de campo e não existindo fatores limitantes, com uma população de até 16 plantas m⁻² e com 40 dias após a germinação (SUMMERFIELD, 1985). O incremento à população de plantas de feijão, em geral, ocasiona o aumento do índice de área foliar, entretanto, quando se reduz a população, as plantas do feijão apresentam, individualmente, valores mais elevados de área foliar (MATOSO, 2014).

Sob déficit hídrico as plantas utilizam três formas principais de defesa incluindo a redução da área foliar. Desta forma haverá menor transpiração, conservando de forma efetiva, um suprimento de água limitado no solo por um período mais longo (TAIZ; ZEIGER, 2009). Outra forma de defesa é o alongamento das raízes para atingirem camadas mais profundas do solo para resistirem às condições de déficit hídrico. Por fim, caso a restrição hídrica ocorra após a planta já ter atingido a plena área foliar, em tais condições apresentará respostas fisiológicas para sua proteção, como o fechamento dos estômatos, reduzindo a evapotranspiração. Porém, com o fechamento dos estômatos, ocorre a diminuição na absorção de CO₂ e, conseqüentemente, redução no rendimento de grãos. A variação que ocorre na área foliar ao longo do tempo, geralmente, apresenta um aumento linear até o máximo, permanecendo por um período e decrescendo logo após esse período em razão da senescência das folhas velhas (CONCEIÇÃO, 2016).

De acordo com Oliveira et al. (2016), para estudar o crescimento das plantas é necessário o conhecimento da área foliar, pois a área foliar é um parâmetro importante no entendimento da fotossíntese, interceptação luminosa, uso da água e nutrientes e o potencial produtivo. Bastos et al. (2012) encontraram valores máximos de índice de área foliar variando de 3,3 a 4,9 para a cultura do feijão-caupi, cultivar BRS Paraguaçu e de 3,5 a 4,9 para a cultivar BRS Guariba.

Nascimento et al. (2011), avaliando as características fisiológicas e reprodutivas em genótipos de feijão-caupi, submetidas ao déficit hídrico em Teresina, Piauí, em um Argissolo Amarelo de textura franco-arenosa, observaram que houve uma redução de 20% do índice médio de área foliar. Já em condições de

irrigação plena, os valores máximos de IAF foram 5,0 e 3,9 para os genótipos BRS Paraguaçu e Pingo-de-ouro, respectivamente.

Bezerra et al. (2009), estudando as características de dossel e de rendimento em feijão-caupi de porte ereto sob diferentes densidades populacionais em um Neossolo Flúvico no município de Teresina-PI, verificaram que o aumento da densidade populacional de 100 mil para 500 mil plantas ha⁻¹ reduziu em 84,5% o número de ramos laterais diminuindo, conseqüentemente, a área foliar da planta e a produção de grãos.

Oliveira et al. (2015), avaliando diferentes populações de plantas e lâminas de irrigação em Argissolo vermelho-amarelo no município de Teresina - PI observaram interação significativa entre densidades populacionais e níveis de irrigação aplicados na área foliar do feijão-caupi, sendo que o aumento da área foliar por planta ocorreu até o ponto máximo de 1.301,89 cm² com a lâmina de 367,86 mm e densidade de 188.000 plantas ha⁻¹. O aumento da área foliar proporcionou um incremento na capacidade da planta em aproveitar a energia solar visando realizar a fotossíntese e, desta forma, pôde ser utilizada para aumentar a produtividade (REIS et al., 2013). No entanto, François (2012), avaliando as relações hídricas e as trocas gasosas em plantas de feijão-caupi submetidas à irrigação deficitária, observou que a redução da irrigação de 100% para 25% da ETc acumulada reduziu linearmente o índice de área foliar das plantas de feijão, do estágio de pré-floração até o final do ciclo da cultura, corroborando com Souza et al. (2017) que avaliando a produção de área foliar e biomassa e produtividade do feijão-caupi sob regimes hídricos em Castanhal, Pará, observaram que, em condições de déficit hídrico de 76 mm, o índice de área foliar apresentou redução de 47%.

2.8.2 Fotossíntese

Os índices fisiológicos, como a taxa de assimilação de CO₂, transpiração, condutância estomática e temperatura foliar são afetados por fatores ambientais, como luz, temperatura, concentração de CO₂ e disponibilidade de água e nutrientes (TAIZ; ZEIGER, 2013). Assim, há necessidade de se conhecer o comportamento fisiológico da cultivar BRS Itaim, através da interação desses parâmetros com os regimes hídricos e as densidades de plantas empregadas.

A produtividade de grãos do feijão-caupi depende da fotossíntese, processo em que a radiação solar é interceptada pelo dossel das plantas, sendo transformada em energia química que é utilizada para converter o dióxido de carbono do ar e da água em glicose (açúcares simples). Desta forma, a folha constitui o principal órgão da planta envolvido na fotossíntese sendo responsável pelas trocas gasosas entre os vegetais e a atmosfera, motivo pelo qual é de reconhecida importância o conhecimento da superfície foliar para a avaliação de técnicas culturais como poda, adubação, densidade de plantio, evapotranspiração, irrigação, interceptação da luz, eficiência fotossintética e aplicação de defensivos (BLANCO; FOLLEGATTI, 2005).

Oliveira (2013), avaliando a densidade populacional do feijão-caupi sob níveis de irrigação em Teresina-PI, observou aumento na taxa fotossintética das plantas submetidas à aplicação de lâminas de 300,50; 340,34 e 393,53 mm, apresentando valores de 21, 26 e 29 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente. Constatou ainda que os menores valores de fotossíntese ($10,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ocorreram em condições de déficit hídrico, lâmina de (260,39 mm).

Mariano et al. (2009) afirmaram que, com relação às trocas gasosas, se a disponibilidade de água é reduzida, provoca uma diminuição nos valores de condutância estomática e de transpiração por causa do fechamento estomático, e, como consequência, tem-se redução nas taxas de fotossíntese.

Silva et al. (2016), avaliando o crescimento e trocas gasosas de feijão-caupi, encontraram valores de fotossíntese de $22,7 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para cultivar BRS Itaim em plantio convencional no município de Pombal, PB. Souza et al. (2016), analisando crescimento e trocas gasosas do feijão-caupi cv. BRS Pujante em Pombal, PB, sob níveis de água disponível, observaram redução linear da taxa de assimilação de CO_2 conforme o aumento da água disponível no solo.

Araújo (2014), avaliando o feijão-caupi no litoral cearense, encontrou, para a cultivar Setentão, um valor médio de fotossíntese de $30,18 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

De acordo com Ferraz et al. (2012), o entendimento das trocas gasosas nas plantas em relação com o estresse hídrico é de fundamental importância para a escolha de cultivares tolerantes, por ser uma ferramenta que determina a adaptabilidade e estabilidade de plantas a determinados ecossistemas.

Silva et al. (2010), avaliando trocas gasosas do feijão-caupi variedade BRS Xique-Xique, cultivado sob diferentes níveis de deficiência hídrica, observaram que

quando essas plantas tiveram reposição de 50% da água perdida por evapotranspiração, não houve danos ao aparelho fotossintético.

François (2012) avaliou as relações hídricas e as trocas gasosas em plantas de feijão-caupi submetidas à irrigação deficitária em Santa Maria, RS e observou que a redução da irrigação de 100% para 25% da ET_c acumulada apresentou reduções lineares nos valores de taxa fotossintética das plantas, a partir dos 30 DAE.

Silva (2014), estudando componentes de produção e fisiológicos em ecótipos de *vigna* sob reposição hídrica, observou que a taxa de fotossíntese apresentou redução linear entre as lâminas de 100% para 40% da ET_c.

Silva et al. (2010), avaliando as trocas gasosas em plantas de feijão-caupi submetidas à deficiência hídrica, no município de São Cristóvão-SE, observaram que às 10h00min, foi o horário de maior assimilação fotossintética, devido à maior disponibilidade de radiação fotossinteticamente ativa.

Dutra et al. (2015), avaliando parâmetros fisiológicos e componentes de produção do feijão-caupi, no município do Catolé do Rocha-PB, constataram que as maiores taxas fisiológicas foram observadas nas lâminas sob déficit hídrico.

2.8.3 Condutância estomática

As entradas e saídas de CO₂ e água nas folhas são reguladas pela abertura ou fechamento estomático, que pode ser quantificado pela leitura da condutância estomática. Constata-se que a redução da condutância estomática promove uma menor transpiração, favorecendo uma menor perda de água, ocasionando, assim, a maior tolerância das plantas a estresses abióticos (DUTRA et al., 2015).

Oliveira (2013), avaliando a densidade populacional do feijão-caupi sob níveis de irrigação em Teresina, PI, observou incremento na condutância estomática à medida que se aumentaram os níveis de irrigação.

O controle estomático é um importante meio fisiológico onde as plantas regulam a perda de água, promovendo reduções na condutância estomática e, geralmente, diminuindo as trocas gasosas como forma de resposta das plantas a diversos fatores, incluindo o déficit hídrico (PAIVA et al., 2005).

Plantas de feijão, submetidas ao déficit hídrico, diminui a condutância estomática e aumenta a resistência difusiva ao vapor de água, mediante o

fechamento dos estômatos, reduzindo a transpiração e, em consequência, o suprimento de CO₂ para a fotossíntese (OLIVEIRA et al., 2005). Assim, como consequência da redução na condutância estomática, há um aumento da temperatura foliar e redução na produção de fotoassimilados, causando redução na produtividade de grãos (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Fernandes et al. (2015), avaliando o efeito de manejos do solo quanto ao déficit hídrico, trocas gasosas e rendimento do feijão-de-corda no semiárido, observaram que as trocas gasosas do feijão-caupi (condutância estomática, taxa fotossintética, taxa de transpiração e temperatura foliar) em relação às práticas de preparo e manejo do solo não influenciaram de forma significativa, quando a umidade do solo se encontrava próxima ao valor da capacidade de campo. No entanto, na condição de um veranico de dez dias, os resultados apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos para as variáveis de trocas gasosas (condutância estomática, fotossíntese e transpiração).

Araújo (2014), estudando o feijão-caupi no litoral cearense, verificou que a condutância estomática atingiu maiores valores na fase vegetativa com valor médio de 0,85 mol m⁻² s⁻¹, e no decorrer das épocas de floração e formação da produção, apresentou reduções de 30%, 60% e 37%, respectivamente. Enquanto Dutra et al. (2015), analisando parâmetros fisiológicos e componentes de produção de feijão-caupi cultivado sob deficiência hídrica, obtiveram, para as cultivares BRS Guariba e BRS Marataoã, incrementos de 17% e 15% na condutância estomática, com o aumento na reposição das lâminas, em relação aos valores obtidos com 100% da ETo (0,453 e 0,352 mol m⁻² s⁻¹).

Souza et al. (2017), avaliando a condutância estomática do feijão-caupi em Castanhal, Pará, observaram redução de 73% na fase de enchimento de grãos, devido a menor disponibilidade hídrica nesta fase. Concordando com

Nascimento (2009), que avaliando o efeito do déficit hídrico em feijão-caupi para identificação de genótipos com tolerância à seca em Teresina, PI, observou redução na condutância estomática (gs) de 72% na lâmina de irrigação de 190 mm e uma redução de 60 % na produtividade de grãos.

2.8.4 Transpiração

A transpiração é um parâmetro fisiológico afetado pelo déficit hídrico, interferindo diretamente na produtividade das plantas, auxiliando na translocação de compostos dentro da célula e resfriamento dos tecidos das mesmas. Para Larcher (2006), os estômatos atuam como moduladores da perda de água pela transpiração, respondendo ao déficit hídrico com a alteração da abertura do poro a uma faixa crítica de valores do potencial hídrico foliar. Desta forma, o tipo de vegetação e o estágio de crescimento são fatores que modificam a intensidade da taxa de transpiração, além da temperatura, umidade relativa e as correntes de vento que influenciam as taxas de transpiração (SANTOS, 2016).

A redução da transpiração ocorre devido ao fechamento estomático, que é uma das primeiras respostas da planta à redução da disponibilidade de água. De acordo com Larcher (2006), a transpiração e a resistência difusiva (que é inversamente proporcional à condutância estomática) são processos que têm sido correlacionados ao déficit hídrico. Em condições normais, a taxa de transpiração nas folhas é determinada especialmente pela radiação, pelo déficit de saturação e pela condutância estomática.

Oliveira (2013), avaliando a densidade populacional do feijão-caupi sob níveis de irrigação em Teresina, PI, observou que nas densidades de plantas (300.000 plantas ha⁻¹) e lâminas de irrigação (340 mm), a taxa de transpiração foi de 4,5 mmol⁻² s⁻¹, enquanto que, nas densidades de plantas (200.00 plantas ha⁻¹) e lâminas de irrigação (260 mm) constatou-se aumento na taxa de transpiração para 6,28 mmol⁻² s⁻¹.

Silva et al. (2010), avaliando as trocas gasosas em plantas de feijão-caupi submetidas à deficiência hídrica, observaram que em leituras realizadas entre 10 e 12 h obtiveram taxas de transpiração de 7,78 e 7,40 mmol m⁻² s⁻¹ em plantas irrigadas com 100% e 50% da água perdida por evapotranspiração, porém, quando estes autores aplicaram lâmina de 25%, encontraram taxas de transpiração inferiores a 1,3 mmol m⁻² s⁻¹.

François (2012), estudando as relações hídricas e trocas gasosas em plantas de feijão-caupi submetidas à irrigação deficitária constatou que a taxa de transpiração das plantas de feijão diminuiu linearmente com a redução da irrigação de 100% (11,65 mmol m⁻² s⁻¹) para 25% (8,05 mmol m⁻² s⁻¹) da ETo.

Dutra et al. (2015), avaliando parâmetros fisiológicos e componentes de produção de feijão-caupi cultivado sob deficiência hídrica, observaram que a taxa de transpiração na cultivar BRS Marataoã, ajustou-se ao modelo quadrático com menor valor de $2,96 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ao repor lâmina estimada de 80% da ETo.

2.8.5 Eficiência instantânea do uso da água

Em condições de déficit hídrico nos estádios de crescimento inicial das plantas, os estômatos se fecham e a eficiência do uso da água pode aumentar, pois o fechamento estomático inibe a transpiração. Desta forma, as plantas mobilizam e utilizam reservas para onde são necessárias quando o déficit hídrico é rigoroso e coloca em prática a capacidade de translocação dos fotoassimilados (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Souza et al. (2016), avaliando crescimento e trocas gasosas do feijão-caupi cv. BRS Pujante sob níveis de água disponível no solo em Campina Grande, PB, observaram que a eficiência instantânea do uso da água respondeu de forma linear decrescente em função do aumento da água disponível com valor de $3,24 (\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}) (\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1})^{-1}$.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

Dois experimentos foram conduzidos no campo Experimental da Embrapa Meio-Norte, em Teresina, Piauí (5°05' S; 42°29' W e 74,40 m), no período de junho a agosto de 2016, um em sistema de plantio convencional e outro em sistema de plantio direto. O clima do município, de acordo com a classificação climática de Thornthwaite e Mather, é do tipo C1sA'a', com temperatura média anual de 28,2 °C e precipitação média anual de 1.342,40 mm (BASTOS; ANDRADE JÚNIOR, 2015).

O solo da área experimental é um Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico, relevo com elevação muito suave, declividade de 0 a 3% (MELO et al. 2014), cujas características químicas estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Análise química do solo da área experimental. Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI, 2016

| Prof. (m) | MO g kg ⁻¹ | pH H ₂ O | P mg dm ⁻³ | K ⁺ | Na ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Al ³⁺ | H ⁺ +Al ³⁺ | CTC | V (%) |
|--------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|----------------------------------|-----|----------|
| 0,0 - 0,2 | 7,7 | 6,1 | 34,4 | 0,2 | 0,04 | 2,2 | 0,5 | 0,05 | 1,4 | 4,5 | 66,8 |
| 0,2 - 0,4 | 8,5 | 6,0 | 25,1 | 0,2 | 0,04 | 2,1 | 0,5 | 0,05 | 1,9 | 4,9 | 60,0 |

Fonte: Laboratório de solos da Embrapa Meio-Norte

As amostras para a caracterização físico-hídrica e química do solo da área do experimento foram coletadas, nas camadas de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m. As características físico-hídricas estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características físico-hídricas do solo da área experimental, Embrapa Meio Norte. Teresina, PI, 2016

| Prof. (m) | Granulometria (g/kg ⁻¹) | | | | Ds* | CC | PMP | Classif. |
|--------------|-------------------------------------|---------------|-------|--------|---------------------|-------------|-------|-------------------|
| | Areia Grossa | Areia Fina | Silte | Argila | Kg dm ⁻³ | % em volume | | Textural |
| 0,00-0,20 | 532,0 | 344,5 | 37,5 | 86,0 | 1,65 | 22,00 | 9,34 | Areia Franca |
| 0,20-0,40 | 453,0 | 358,5 | 52,5 | 136,0 | 1,70 | 20,83 | 11,00 | Franco arenoso |

Fonte: Laboratório de Solos - Embrapa Meio-Norte. * Ds: densidade do solo. CC: capacidade de campo definida a - 10 kPa. PMP: ponto de murcha permanente definida a -1500 kPa

3.2 Dados climáticos

Os dados climáticos de temperaturas do ar, máxima, média e mínima no período de condução do experimento, estão apresentados na Figura 1.

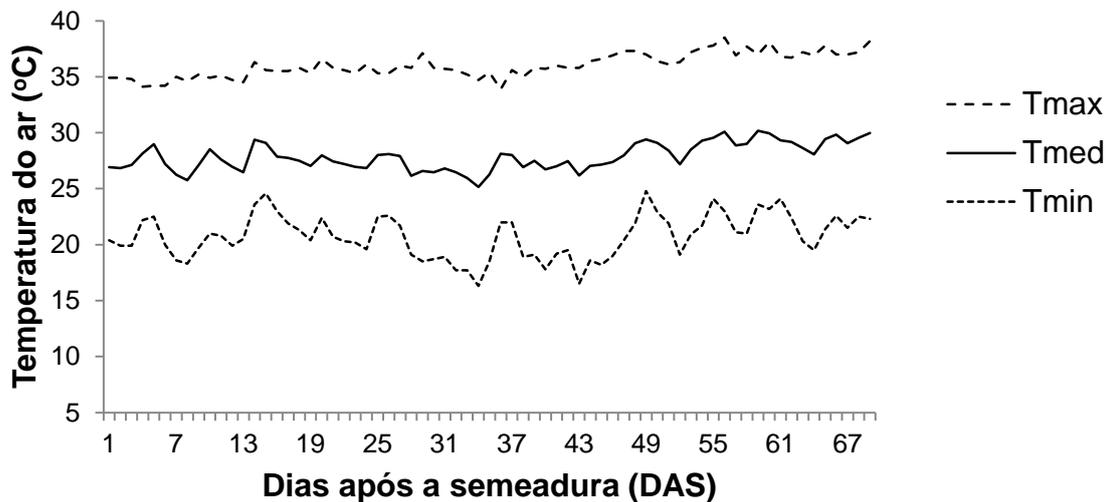


Figura 1. Variação das temperaturas do ar máxima (Tmax), média (Tmed) e mínima (Tmin) do ciclo do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim. Teresina, PI, 2016

3.3 Delineamento experimental

Para cada experimento utilizou-se o delineamento em blocos casualizados, em parcelas subdivididas, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram de cinco regimes hídricos: 50%, 75%, 100%, 125% e 150% da ETc, que corresponderam a 157, 189, 234, 274, e 320 mm, respectivamente, nas parcelas e cinco densidades de plantas (12, 16, 20, 24 e 28 plantas m⁻²) nas subparcelas. Essas densidades foram escolhidas, por constituírem densidades abaixo e acima da média recomendada para a cultivar BRS Itaim.

Cada experimento foi constituído por 100 subparcelas em cada sistema de plantio. Cada subparcela continha quatro fileiras de 4 m, espaçadas por 0,5 m. A área útil da subparcela foi constituída pelas duas fileiras centrais, totalizando 4,0 m⁻².

3.4 Preparo do solo, adubação e semeadura

O preparo do solo, no sistema de plantio convencional, consistiu de roço, uma aração e uma gradagem. Na área do sistema de plantio direto, a palhada utilizada foi de braquiária e sorgo. No ano anterior, foi utilizada uma palhada de cana-de-açúcar, oriunda de outra área experimental.

A adubação de fundação nos dois sistemas foi efetuada com base na análise de solo e seguindo as exigências nutricionais do feijão-caupi, consistiu na aplicação de 50 kg de P_2O_5 ha^{-1} (superfosfato simples) e 40 kg de K_2O ha^{-1} (cloreto de potássio) (MELO; CARDOSO, 2017).

A semeadura foi realizada dia 24 de junho de 2016, com o uso de matraca nos dois sistemas de plantio, utilizando o espaçamento de 0,50 m entre sulcos de plantio, com as sementes posicionadas a 0,03 m de profundidade no solo. Foi semeada a máxima densidade de plantas (14 plantas m^{-2}), e aos 15 dias após a semeadura fez-se o desbaste, de modo a ajustar os tratamentos propostos na metodologia deste trabalho. A colheita foi realizada no dia 29 de agosto de 2016.

Os tratos culturais foram realizados de modo a manter a cultura livre de plantas invasoras, realizado manualmente com o uso de enxada, sempre que necessário. O controle de pragas foi realizado com inseticida à base de *Thiamethoxam* na dose de 150 ML/ ha^{-1} . Realizou-se o monitoramento periódico das plantas por meio de observações foliares, para constatação de pragas e doenças.

3.5 Sistema de irrigação

As irrigações foram efetuadas por um sistema de aspersão convencional fixo, com aspersores de impacto com bocais de 4,4 x 3,2 mm, vazão de 1,59 $m^3 h^{-1}$ com uma pressão de serviço de 30 mca, espaçados de 12 x 12 m ($P= 11,04$ mm h^{-1}). Para verificar a eficiência da aplicação (E_a) da lâmina de irrigação em cada tratamento, aos seis dias após a semeadura, foram instalados 16 coletores em cada regime hídrico perfazendo um total de 80 coletores nas áreas experimentais.

3.5.1 Regimes Hídricos

O tempo de aplicação dos regimes hídricos foi determinado por meio da reposição da evapotranspiração da cultura (ET_c), com base na evapotranspiração de referência (ET_o), estimada pelo método de Penman-Monteith, conforme metodologia proposta por Allen et al. (1998), no coeficiente de cultura (K_c) do feijão-caupi e na eficiência de aplicação para cada tratamento recomendado por Andrade Júnior et al. (2000) (Tabela 3). A ET_o foi estimada com base em dados climáticos médios diários de temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar global e velocidade do vento obtidos de uma estação agrometeorológica automática instalada próximo do experimento.

Tabela 3. Valores de coeficiente de cultura para o feijão-caupi, em diferentes fases do ciclo utilizado no experimento

| Fase do ciclo | Dias após a semeadura | Coeficiente de cultura |
|---------------|--------------------------|---------------------------|
| I | 0 – 15 | 0,50 |
| II | 16 – 34 | 0,80 |
| III | 35 – 53 | 1,20 |
| IV | 54 – 63 | 0,80 |

Fonte: Andrade Júnior et al. (2000)

Até os 18 dias após a semeadura foram aplicadas lâminas diárias na quantidade de 100% da ET_c do dia anterior, de modo a garantir a germinação e o desenvolvimento inicial das plantas. A partir dos 18 dias após a semeadura foram iniciados os regimes hídricos definidos nos tratamentos, com irrigações nas segundas, quartas e sextas-feiras, repondo-se a ET_c acumulada dos dias anteriores que não foram irrigados.

Ressalta-se que durante o período de condução do experimento não houve a ocorrência de precipitação pluviométrica, portanto, a resposta produtiva ocorreu apenas em função da aplicação das distintas lâminas de irrigação aplicadas.

3.5.2 Monitoramento do teor de água no solo

O monitoramento do teor de água no solo (% em volume) foi realizado por meio de uma sonda de capacitância modelo Diviner 2000® da Sentek Pty Ltda, Austrália. Foram instalados, aos 20 dias após a semeadura, 15 tubos de PVC, três em cada regime hídrico, na densidade intermediária (D3). As leituras de frequência relativa (FR) foram realizadas de segunda à sexta-feira, pela manhã antes da irrigação e nas sextas no fim da tarde, após a irrigação. O equipamento media e registrava as frequências em camadas de solo de 0,1 em 0,1 m até a profundidade de 0,6 m.

Os valores de frequência relativa foram convertidos em percentagem de água no solo por meio da equação 1.

$$\theta_v = a * FR^b \dots\dots\dots(1)$$

Em que:

θ_v = Umidade volumétrica ($m^3 m^{-3}$);

FR= Frequência relativa medida pela sonda, adimensional;

a e b = Coeficientes gerados pela regressão.

As equações de calibração, para todo o perfil em diferentes camadas foram obtidas por meio da calibração no solo da área experimental, (SILVA et al., 2006).

3.6 Componentes de produção e produtividade de grãos

Foram avaliados os seguintes componentes de produção:

- Número de vagens por plantas (NVP): média da contagem direta do número de vagens de todas as plantas da área útil dividido pelo total de plantas;
- Número de vagens por área (NVA);
- Número de grãos por vagem (NGV): corresponde à média do número de grãos em dez vagens escolhidas ao acaso da área útil da subparcela;

- Comprimento de vagem (CVg, cm): comprimento médio, em cm, de 10 vagens, tomadas ao acaso da área útil da parcela.

A produtividade de grãos secos (PG, kg ha⁻¹) foi obtida após a colheita das duas fileiras da área útil de cada parcela experimental, por meio da debulha manual de todas as vagens, pesagem dos grãos e correção do teor de umidade para 13%. Foi calculada a produtividade de grãos atual (kg ha⁻¹) e a produtividade de grãos corrigida (kg ha⁻¹), conforme as equações 2 e 3, respectivamente.

$$PG_a = \frac{10}{AU} \times Pg \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

PG_a: Produtividade de grãos atual (kg ha⁻¹)

AU: área útil da parcela (m²)

Pg: peso de grãos da parcela (g)

$$PG_c = \frac{(100 - U_a) \times PG_a}{100 - U_d} \quad \text{Eq. (3)}$$

PG_c: Produtividade de grãos corrigida (kg ha⁻¹)

PG_a: Produtividade de grãos atual (kg ha⁻¹)

U_a: Umidade inicial encontrada no grão por ocasião da colheita (%)

U_d: Umidade desejada = 13%

3.7 Eficiência do uso da água (EUA)

A EUA, em kg m⁻³, foi estimada dividindo-se as produtividades de grãos secos kg. ha⁻¹ m⁻³ pelas lâminas de irrigação aplicadas (mm) transformadas em volume aplicado por hectare (m³), conforme a equação 4.

$$EUA = \frac{PG_c}{L \times 10}, \text{ (kg m}^{-3}\text{)} \quad \text{Eq. 4}$$

EUA – eficiência do uso de água, (kg m⁻³);

PG_C – produtividade de grãos corrigida, (kg ha^{-1});

L – lâmina de irrigação aplicada (mm) transformada em volume de água aplicado por hectare ($\text{m}^{-3} \text{ha}^{-1}$).

3.8 Índice de área foliar, fotossíntese, condutância estomática, transpiração e eficiência instantânea do uso da água

O índice de área foliar (IAF) foi determinado durante o período de quatro semanas, sendo quantificado aos 38, 45, 52 e 59 dias após a semeadura. Em cada período foram realizadas quatro leituras de radiação (uma em cima e três em baixo do dossel) realizadas pela manhã, utilizando o equipamento portátil LAI-2000 Analisador de dossel - Li-Cor, em cada subparcela, na posição central da área útil, e posteriormente foi estimada a média aritmética para cada período. A relação entre a luz incidente acima da cultura e abaixo da copa das plantas fornece a transmitância de cada ângulo, que é inversamente proporcional ao índice da área foliar (HOFFMAN; BLOMBERG, 2004).

Aos 55 dias após a semeadura, período em que a diferenciação entre os tratamentos hídricos estava bem caracterizada, determinou-se a taxa fotossintética líquida por unidade de área foliar ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), a condutância estomática ao vapor d'água ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e a taxa transpiratória ($\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$). As medidas foram realizadas entre 7:00 e 09:00 horas da manhã, em folhas saudáveis e completamente expandidas de cada planta, de acordo com metodologia descrita por Mendes et al. (2007). Os regimes hídricos para essas variáveis foram apenas com e sem deficiência hídrica correspondente às lâminas de 135 e 239 mm. Foi utilizado o equipamento portátil de análises de trocas gasosas por meio de infravermelho (IRGA, Infrared Gas Analyzer), modelo Li-6400XT (Portable Photosynthesis System-LI) da LICOR (Figura 2), sendo a leitura realizada na terceira ou quarta folha contadas a partir do ápice da planta.



Figura 2. Medições de fotossíntese, condutância estomática, transpiração e eficiência instantânea do uso da água, com o analisador de gases infravermelho portátil (IRGA), modelo Li – 6400XT, em feijão-caupi, BRS Itaim, em plantio convencional e direto. Teresina, PI, 2016

3.9 Análise estatística

Antes de proceder à análise estatística dos dados, realizaram-se análises de resíduos para todos os caracteres, possibilitando avaliar a existência de dados discrepantes, a homocedasticidade de variância e o ajuste dos erros a uma distribuição aproximadamente normal (NOGUEIRA, 2007).

Utilizou-se a regressão na análise de variância seguindo o método proposto por Custódio et al. (2000), Pimentel-Gomes (2009) e Zimmermann (2014). Com o intuito de facilitar a análise e interpretação dos resultados (evitando a discussão de interações complexas), adotou-se o modelo reduzido constituído por nove parâmetros contendo os efeitos isolados linear e quadrático e pelas interações duplas de primeiro e segundo grau, conforme apresentado a seguir:

$$Y = b_0 + b_1A + b_2A^2 + b_3B + b_4B^2 + b_5AB + b_6AB^2 + b_7A^2B + b_8A^2B^2$$

Onde:

Y: variável dependente;

b₀: constante de regressão ;

b₁,...,b₈: coeficientes da regressão e

A e B: variáveis independentes, constituídas pelos níveis de lâmina de irrigação e densidade de planta, respectivamente.

Em função do teste t , obteve-se a seleção do melhor modelo com o auxílio das significâncias de cada parâmetro, aceitando nível de significância até o limite de 15% de probabilidade (CONAGIN; JORGE, 1982). A solução mais adequada é função, também, da interpretação biológica dos gráficos da função resposta. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando-se software SAS (SAS INSTITUTE, 2016).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Conteúdo de água no solo

Os valores da variação média do teor de água no solo na profundidade de 0,0 a 0,2 m, em função dos diferentes regimes hídricos no feijão-caupi em plantio convencional e direto estão apresentados na Figura 3.

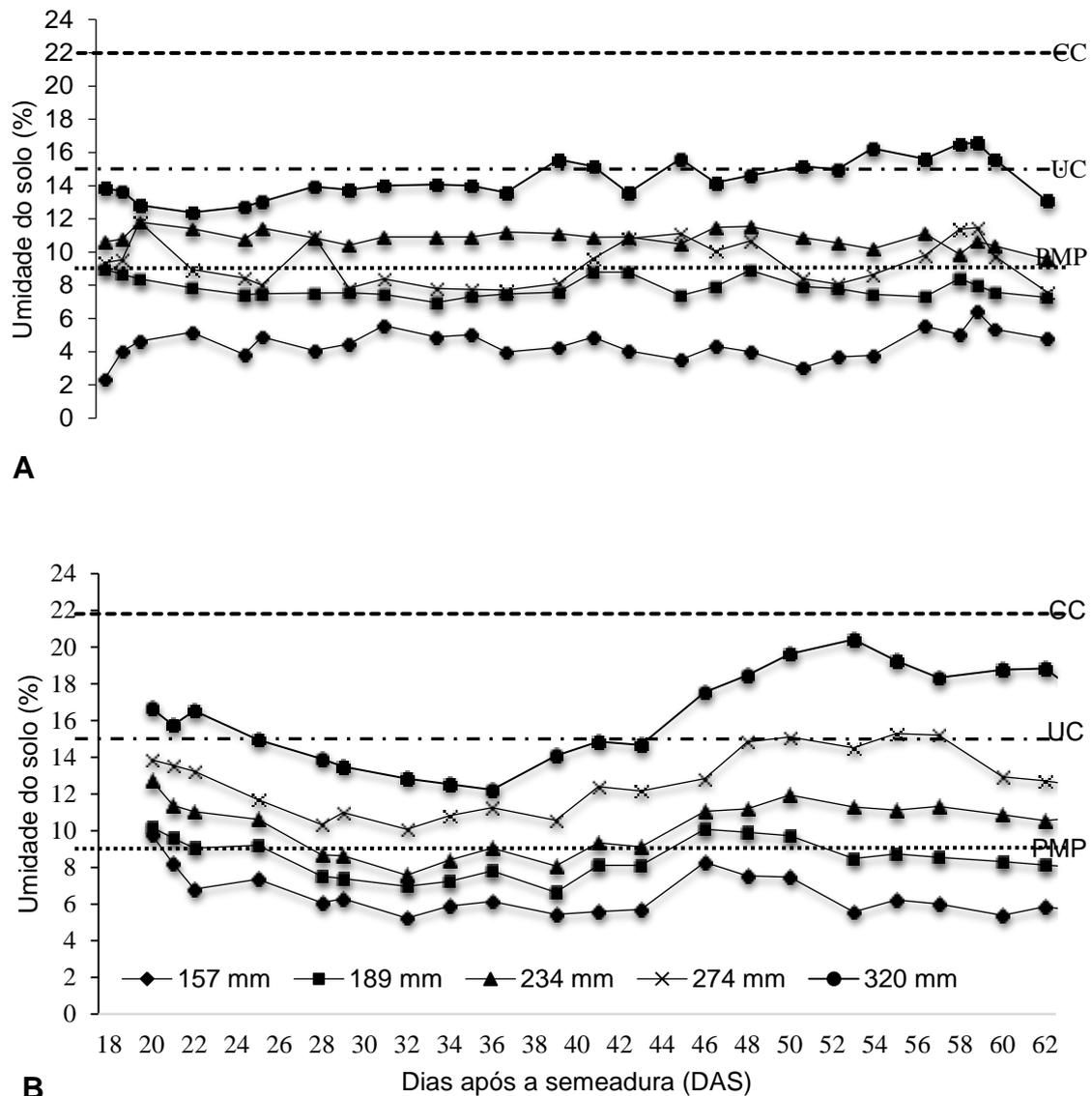


Figura 3. Variação do teor de água no solo para profundidade de 0,0 a 0,2 m, no feijão-caupi, BRS Itaim, para diferentes lâminas de irrigação aplicadas, em sistemas de plantio convencional (A) e direto (B). Teresina, PI, 2016.

CC: capacidade de campo; PMP: ponto de murcha permanente; UC: umidade crítica

No plantio convencional (Figura 3A), com a aplicação dos tratamentos, observou-se uma elevada variação da umidade do solo. Os valores indicaram que o tratamento de maior lâmina de irrigação apresentou valores de umidade do solo abaixo da capacidade de campo, porém muito próximo da umidade crítica. Nos demais regimes hídricos, o teor de água no solo ficou abaixo da umidade crítica, sendo que nas menores lâminas (157 e 189 mm), esse teor ficou abaixo do ponto de murcha permanente. Portanto, pode-se inferir que houve déficit hídrico severo, notadamente nas duas lâminas menores. Isso pode ser justificado em decorrência da ausência de cobertura de solo, que favorece a evaporação de água do solo com mais intensidade.

No plantio direto (Figura 5B), pode-se observar uma diferença na umidade do solo entre os tratamentos, os quais oscilaram entre 5%, imposta com a menor lâmina de irrigação, ficando abaixo do ponto de murcha permanente (9%), e 20%, imposto com o tratamento de maior lâmina de irrigação, que permaneceu próximo da capacidade de campo (22%).

Com isso, constatou-se que houve diferentes níveis de deficiência hídrica. Pode-se observar que para as menores lâminas (157 mm e 189 mm), o teor de água na camada superficial se aproximou do ponto de murcha permanente, durante todo o período da aplicação das lâminas diferenciadas, indicando um déficit hídrico severo, resultando em redução significativa da produtividade de grãos.

4.2 Componentes de produção, produtividade de grãos e eficiência do uso da água

Os resultados mostram que houve efeito significativo para interação entre os regimes hídricos e as densidades de plantas nas variáveis: número de vagens por planta, número de vagens por área, número de grãos por vagem, comprimento de vagem, produtividade de grãos e eficiência do uso da água nos plantios convencional e direto (Tabelas 4 e 5, respectivamente), demonstrando a necessidade de gerar superfícies de resposta para avaliar o efeito entre a aplicação das lâminas de irrigação e das densidades de plantas para estas variáveis.

Tabela 4. Resumo da análise de variância do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, para o número de vagens por planta (NVP), número de vagens por área (NVA), número de grãos por vagens (NGV), comprimento de vagens (CVg; cm), produtividade de grãos (PROD; kg ha⁻¹) e eficiência do uso da água (EUA, kg ha⁻¹ m⁻³), em plantio convencional. Teresina, PI, 2016

| FV | Quadrados Médios ¹ | | | | | | |
|-------------------|-------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| | GL | NVP | NVA | NGV | CV | PROD | EUA |
| Bloco | 3 | 0,0766 ^{ns} | 1,0770 ^{ns} | 0,0167 ^{ns} | 0,4648 ^{ns} | 93554,02 ^{ns} | 1,4497 ^{ns} |
| LÂM | 4 | 2,9683 ^{**} | 58,9908 ^{**} | 0,3240 ^{**} | 10,8009 ^{**} | 2361409,99 ^{**} | 12,8431 ^{**} |
| Erro (a) | 12 | 0,0628 | 0,8747 | 0,0366 | 0,5258 | 112063,67 | 1,4438 |
| DENS | 4 | 1,1349 ^{**} | 5,2283 ^{**} | 0,0488 ^{ns} | 3,5374 ^{**} | 49712,86 ^{**} | 1,2187 ^{**} |
| LÂM*DENS | 16 | 0,1236 ^{**} | 1,8928 ^{**} | 0,0608 [*] | 1,5747 [*] | 34651,65 ^{**} | 0,6226 ^{**} |
| Erro (b) | 60 | 0,0113 | 0,1591 | 0,0313 | 0,4534 | 22517,64 | 0,3650 |
| CV (a) (%) | | 15,87 | 13,63 | 6,64 | 4,95 | 18,94 | 16,44 |
| CV (b) (%) | | 6,72 | 5,82 | 6,14 | 4,59 | 13,88 | 13,80 |

(¹)NVP, NVA e NGV: Dados transformados para \sqrt{x} .

Níveis de significância pelo teste "F": *: significativo a (0,01 < p ≤ 0,05); **: significativo a (p ≤ 0,01); ns: não significativo a (p > 0,05)

Tabela 5. Resumo da análise de variância do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, para o número de vagens por planta (NVP), número de vagens por área (NVA), número de grãos por vagens (NGV), comprimento de vagens (CVg; cm), produtividade de grãos (PROD; kg ha⁻¹) e eficiência do uso da água (EUA, kg ha⁻¹ m⁻³), em plantio direto. Teresina, PI, 2016

| FV | Quadrados Médios ¹ | | | | | | |
|-----------------|-------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| | GL | NVP | NVA | NGV | CV | PROD | EUA |
| BLOCO | 3 | 0,0073 ^{ns} | 0,1119 ^{ns} | 0,0173 ^{ns} | 0,5106 ^{ns} | 6632,83 ^{ns} | 0,1079 ^{ns} |
| LAM | 4 | 2,8578 ^{**} | 50,8047 ^{**} | 0,3269 ^{**} | 15,3268 ^{**} | 3735844,64 ^{**} | 31,7592 ^{**} |
| Erro (a) | 12 | 0,0450 | 0,9553 | 0,0176 | 0,2995 | 78693,29 | 1,3099 |
| DENS | 4 | 1,8514 ^{**} | 3,4373 ^{**} | 0,0858 ^{**} | 1,8223 ^{**} | 123835,42 ^{**} | 2,5241 ^{**} |
| LAM*DENS | 16 | 0,1122 ^{**} | 0,8550 ^{**} | 0,0803 ^{**} | 1,0283 ^{**} | 53664,31 ^{**} | 1,0172 ^{**} |
| Erro (b) | 60 | 0,0180 | 0,2946 | 0,0149 | 0,1568 | 22265,43 | 0,3583 |
| CV (a) | | 10,82 | 11,38 | 4,36 | 3,56 | 23,89 | 23,10 |
| C V (b) | | 6,84 | 6,32 | 4,01 | 2,58 | 12,71 | 12,08 |

(¹)NVP, NVA e NGV: Dados transformados para \sqrt{x} .

Níveis de significância pelo teste "F": *significativo a (0,01 < p ≤ 0,05); **: significativo a. (p ≤ 0,01); ns: não significativo (p > 0,05)

O maior valor do número de vagens por planta (NVP) no plantio convencional (PC) foi de 2,3, (correspondente a 5,3, dados transformados para \sqrt{x}), obtido com a lâmina de 318 mm e densidade de 12 a 14 plantas m^{-2} (Figura 4A).

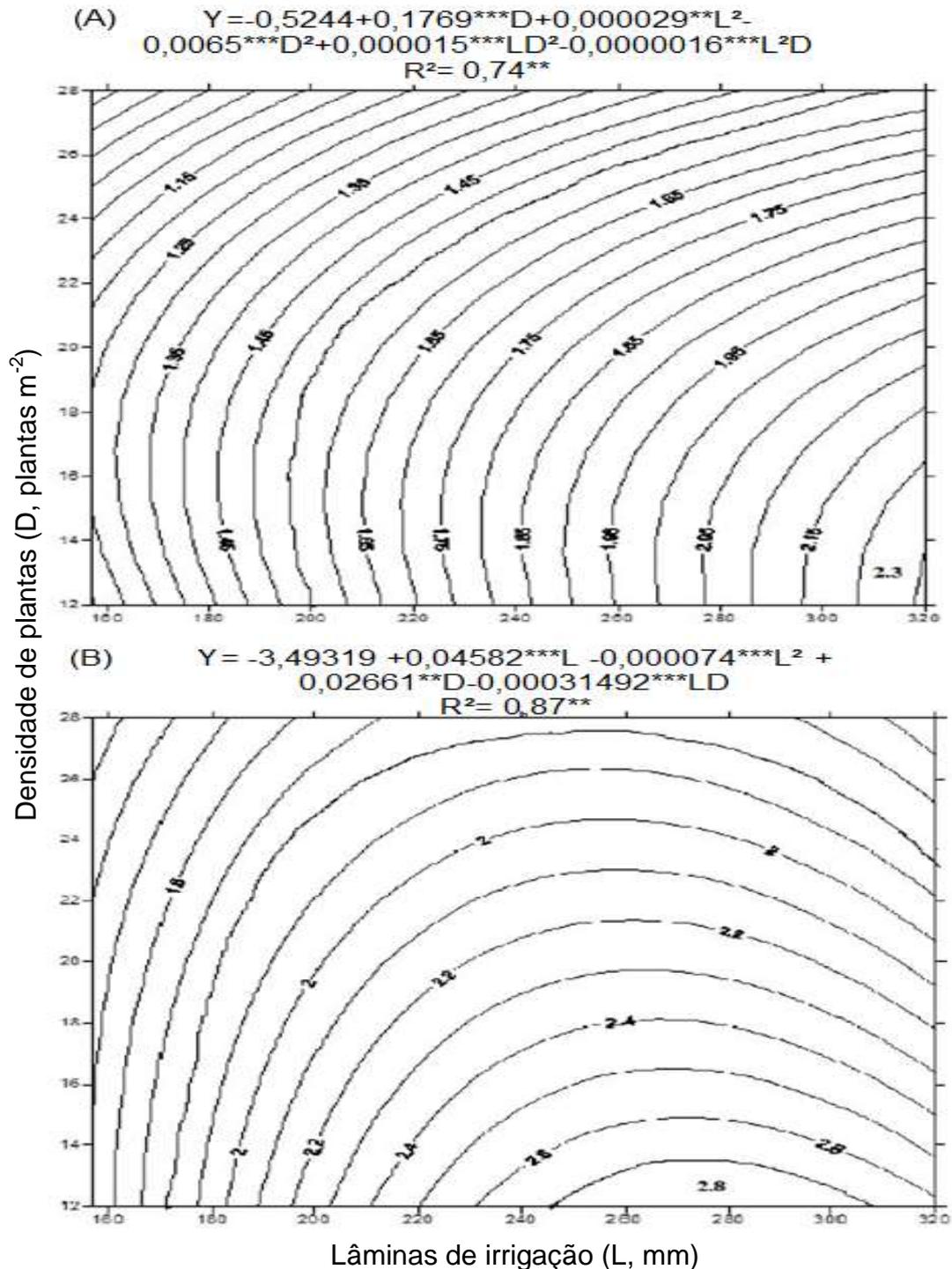


Figura 4. Superfícies de resposta do número de vagens por planta do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, com a aplicação de níveis de irrigação e densidade de plantas em sistemas de plantio convencional (A) e direto (B). Dados transformados para \sqrt{x} . Teresina, PI, 2016

Valores inferiores a 1,55 (correspondente a 2,4), que correspondem a apenas 45% do máximo valor do NVP encontrado (5,3), foram obtidos com lâminas inferiores a 200 mm e densidades superiores a 14 plantas m^{-2} . Esses baixos valores do NVP podem ser justificados pelo fato que o déficit hídrico reduz o crescimento foliar, diminuindo a produção de fotoassimilados e, conseqüentemente, reduz o número de vagens e a produtividade de grãos. Além disso, o NVP é uma variável que reduz com o aumento da densidade de plantas, conforme observado por Bezerra et al. (2012); Cardoso et al. (2013), devido a competição intraespecífica sendo mais pronunciado com o déficit hídrico comprometendo severamente a fotossíntese.

Corroborando com Bezerra et al. (2014) que, analisando a morfofisiologia e produção de feijão-caupi, cultivar BRS Novaera, em resposta às densidades de plantas, no município de Alvorada do Gurguéia, PI, em regime irrigado, verificaram decréscimos lineares no número de vagens por planta em função do aumento da população de plantas, com decréscimo de 66,48% no NVP quando comparadas às populações de 100 mil e 500 mil plantas ha^{-1} , as quais apresentaram em média 14,62 e 4,90 vagens por planta, respectivamente.

No plantio direto, a tendência do NVP foi semelhante à observada no plantio convencional, entretanto, o maior valor alcançado foi de 2,8 (correspondente a 7,8), obtido com densidade de 12 a 14 plantas m^{-2} , com uma lâmina de 282 mm (Figura 4B), portanto, inferior à lâmina de 318 mm que maximizou o NVP no plantio convencional. No plantio direto, esse menor valor de lâmina é explicado em função dos resíduos culturais proporcionarem maior retenção de água no solo, conforme pode ser visualizado na Figura 6B. Valores de NVP inferiores a 1,6 (correspondente a 2,56) para o sistema de plantio direto foram obtidos com as lâminas inferiores a 160 mm e com densidades acima de 16 plantas m^2 , corroborando o efeito prejudicial do déficit hídrico sobre esse componente de produção.

Bastos et al. (2011) avaliaram o efeito do déficit hídrico sobre as características fisiológicas e produtivas do feijão-caupi para selecionar genótipos tolerantes ao déficit hídrico. Os autores observaram que o déficit hídrico, que foi obtido aplicando-se aproximadamente metade da lâmina requerida pelo feijão-caupi, reduziu 175% o número médio de vagens por planta e em 60% a produtividade de grãos.

Os resultados obtidos nessa pesquisa, tanto para o sistema convencional como no plantio direto, mostram que a interação lâmina e densidade de plantas é significativa a % ($p \leq 0,05$). Observa-se que, quanto maior a densidade de plantas e menor a lâmina de irrigação, menor será o valor de NVP. Por outro lado, é possível constatar que o NVP é responsivo à irrigação, resultado que é confirmado por Andrade Júnior et al. 2002, embora com valores máximos de NVP obtido com lâminas de irrigação diferentes das registradas nessa pesquisa.

Em estudos realizados por Locatelli et al. (2014), no cerrado de Roraima, avaliando o componente de produção número de vagens por planta, do feijão-caupi, sob regime irrigado, observaram que para a cultivar BRS Novaera o número de vagens por planta foi de 12,84 com a lâmina de 247,4 mm. Estes autores explicam que os resultados obtidos nesta variável são inerentes às características de cada cultivar.

Andrade et al. (2002), avaliando níveis de irrigação na cultura do feijão-caupi em Parnaíba-PI, verificaram o número de vagem por planta no valor de 25,6 e 15,0 para as cultivares BR 17 Gurguéia e BR 14 Mulato, com a lâmina de irrigação de 449,1 e 363,5 mm, respectivamente. Verificaram que dentre os componentes de produção, o NVP apresenta maior influência na produtividade de grãos com destaque para a cultivar BR 17 Gurguéia.

Em trabalhos realizados por Tagliaferre et al. (2013), avaliando características agronômicas do feijão-caupi em função de lâminas de irrigação, na cidade de Vitória da Conquista, BA, o número de vagens por planta encontrado foi no valor de 16,6 com a lâmina de irrigação de 498,66 mm. Os valores do NVP, obtidos pelos autores acima, são mais de três vezes superiores ao máximo valor de NVP obtido nesse trabalho (5,3). Essas diferenças podem ser justificadas, principalmente, em decorrência das diferentes variedades utilizadas. Nesse trabalho, usou-se a BRS Itaim que se trata de uma variedade de porte ereto e hábito de crescimento determinado (EMBRAPA, 2009) que, naturalmente, possui um NVP inferior às variedades de porte semiereto ou semi-prostrado e com hábito de crescimento indeterminado como a BRS Novaera, BRS Gurguéia e BR 14 Mulato.

Para o número de vagens por área (NVA) verificou-se que o maior valor apresentado no plantio convencional foi de 8,8 (dados transformados para \sqrt{x}), obtido nas densidades de plantas entre (22 a 25 plantas m^{-2}) e na maior lâmina de irrigação utilizada (320 mm), Figura 5A.

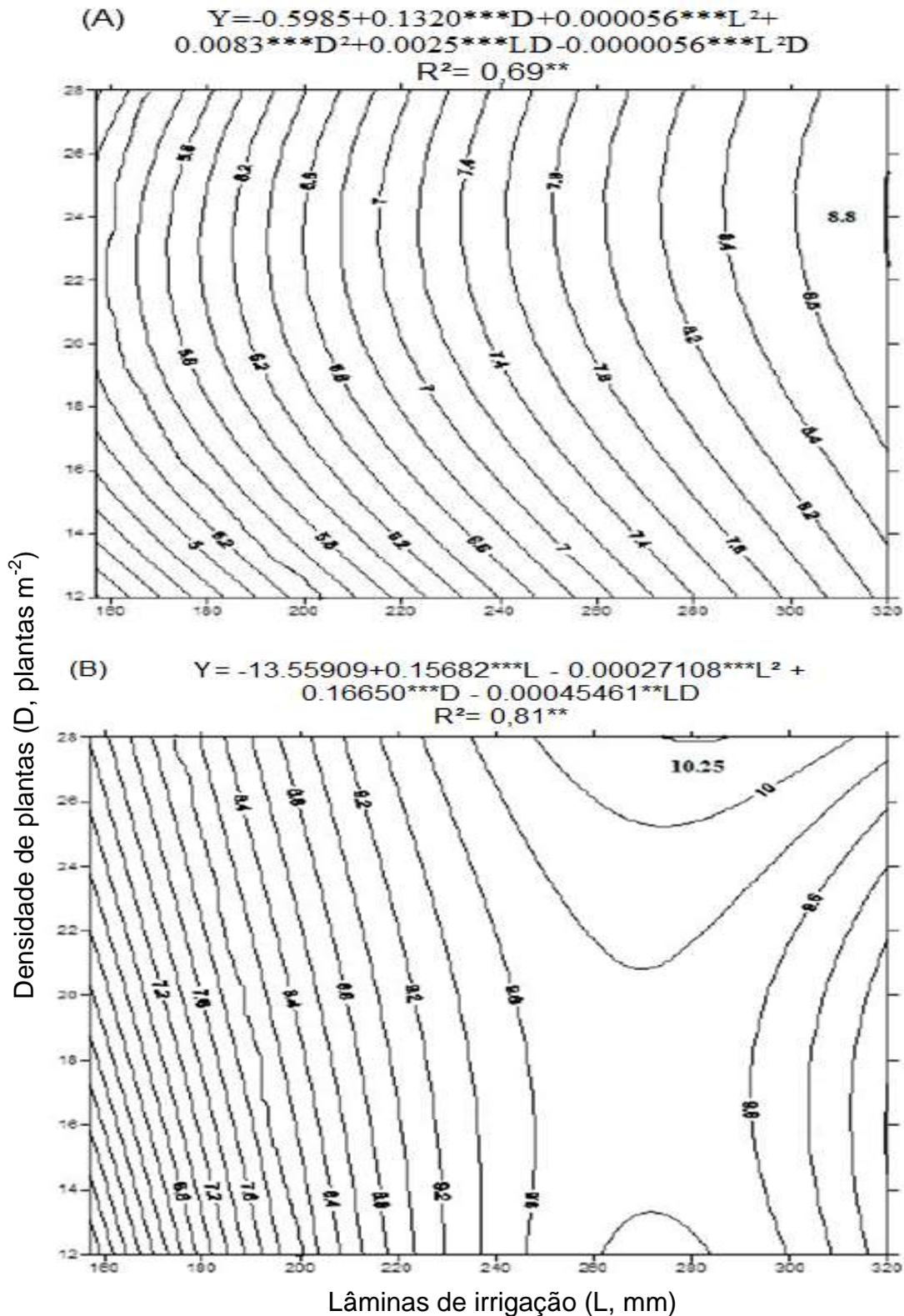


Figura 5. Superfícies de resposta do número de vagens por área, do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, com a aplicação de níveis de irrigação e densidade de plantas em plantio convencional (A) e direto (B). Dados transformados para \sqrt{x} . Teresina, PI, 2016

Os menores valores do NVA no plantio convencional, abaixo de 5,2 (correspondente a 27 vagens m^{-2}), foram obtidos com lâminas inferiores a 200 mm e densidades entre 12 e 19 vagens m^{-2} .

No plantio direto, o valor de NVA máximo foi de 105 (dados transformados para \sqrt{x}), maior que o apresentado no plantio convencional, obtido com a densidade de plantas entre 27 a 28 plantas m^{-2} , entre 274 a 289 mm, de lâmina de irrigação, Figura 5B.

Quanto ao NVA é possível observar que há uma tendência para o aumento da mesma quando se utiliza o maior número de plantas por área (280.000 plantas ha^{-1}) nos dois sistemas de cultivo. Apesar do maior número de plantas por área promover redução na produção de fotoassimilados (competição intraespecífica), ocorre efeito compensatório em decorrência do maior número de plantas por unidade de área, corroborando com trabalhos realizados por Shimada et al. (2000) que observaram que o rendimento de grãos foi favorecido com o aumento da população de plantas por área. Dentre os componentes de produção que podem influenciar na produtividade de grãos do feijão-caupi, o número de plantas por unidade de área é um dos mais importantes, e seu desempenho pode variar de acordo com o tipo de planta, principalmente quando se usa plantas de porte ereto, semiereto e semiprostrado (TRIPATHI; SINGH, 1986).

Valores de NVA inferiores a 6,6 (43,6) para o sistema de plantio direto foram obtidos com lâminas inferiores a 180 mm e com densidades variando de 12 a 20 plantas m^{-2} (Figura 5B). O excesso ou escassez de plantas por área é uma das principais causas da baixa produtividade do feijão-caupi (CARDOSO et al., 2005; BEZERRA et al., 2008) pois a produção por unidade de área é máxima quando se utiliza uma densidade de plantas adequada a cultivar.

O maior valor do número de grãos por vagens (NGV) no plantio convencional (PC) foi de 3,04 (correspondente a 9,2, dados transformados para \sqrt{x}), obtido com a lâmina de 275 mm e densidade de 19 plantas m^{-2} , Figura 6A. Este valor para o NGV está de acordo ao que a cultivar BRS Itaim pode expressar, cujo valor médio é de 9 grãos por vagem (EMBRAPA, 2009).

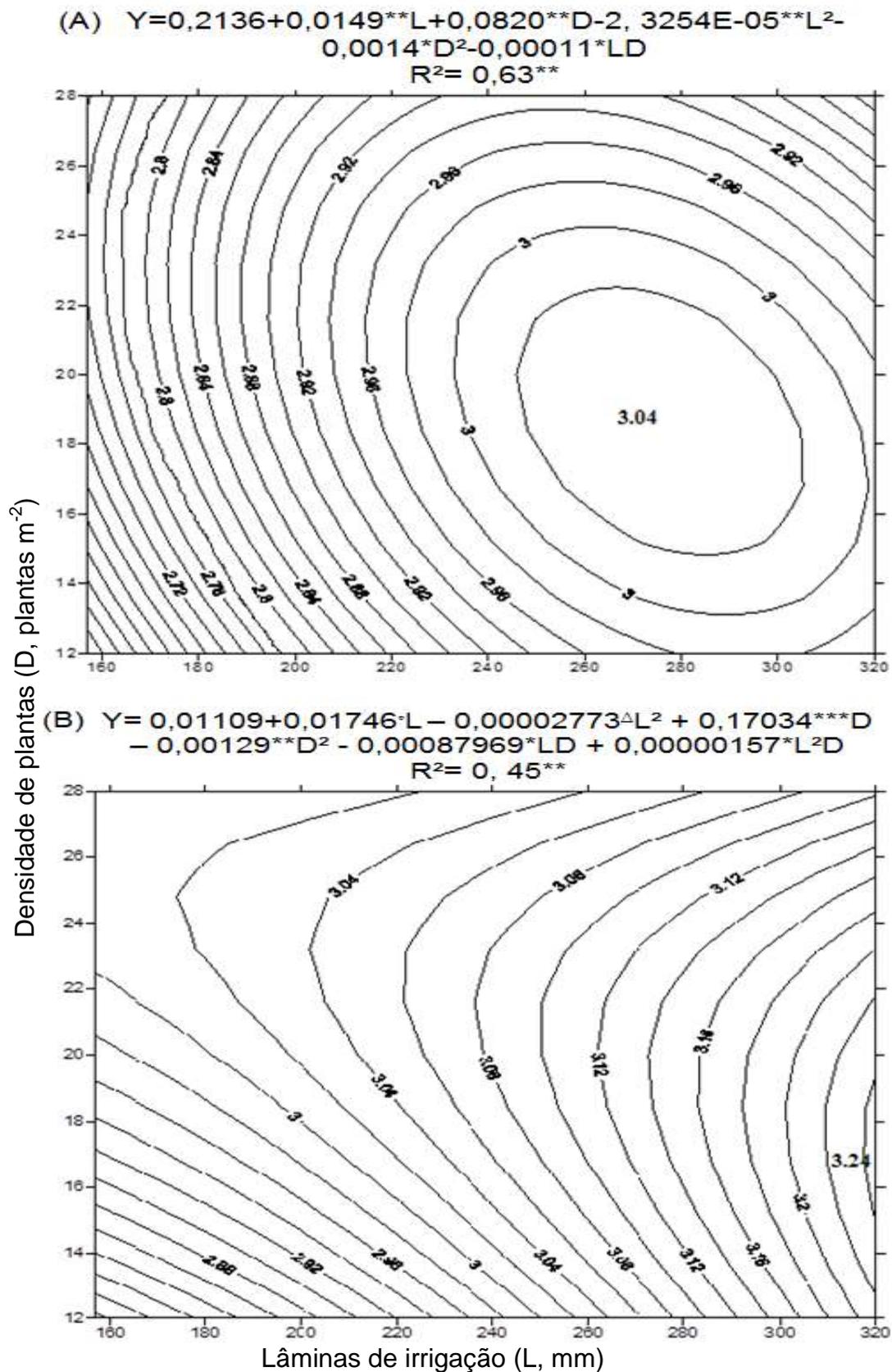


Figura 6. Superfícies de resposta do número de grãos por vagem, do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, com a aplicação de níveis de irrigação e densidade de plantas em plantio convencional (A) e direto (B). Dados transformados para \sqrt{x} . Teresina, PI, 2016

Valores do NGV, abaixo de 2,70 (correspondente a 7,3, dados transformados para \sqrt{x}), foram obtidos com lâminas inferiores a 180 mm e densidade entre 12 a 19 plantas m^{-2} . A redução do NGV pode ser atribuída, principalmente, à deficiência hídrica, imposta nos tratamentos de menor lâmina de irrigação.

No plantio direto, o máximo valor do NGV foi de 3,24 (correspondente a 10,5, dados transformados para \sqrt{x}), obtido com a densidade entre 15 a 19 plantas m^{-2} , com lâmina de 310 mm (Figura 6B). Resultados diferentes foram observados por Locatelli et al. (2014), que avaliando componentes de produção do feijão-caupi no cerrado de Roraima, sob irrigação e em plantio direto, encontraram número de grão por vagem de 13,8; 12,3 e 7,96 para as cultivares BRS Pajeú, BRS Guariba e BRS Novaera, respectivamente. Valores de NGV inferiores a 2,88 (correspondente a 8,3) para o sistema de plantio direto, foram obtidos com lâminas inferiores a 200 mm e com densidade de 15 plantas m^{-2} . Constata-se, dessa forma, que o NGV obtido no cultivo sob plantio direto foi maior do que o obtido em sistema convencional, provavelmente, pela maior disponibilidade hídrica da quele sistema. Assim, pode-se inferir que os resíduos culturais no sistema plantio direto, podem ser uma alternativa de manejo para o cultivo de feijão-caupi.

O maior valor do comprimento de vagem (CVg) no plantio convencional foi de 15,74 cm, obtido com a lâmina de 312 mm e densidade de 17 plantas m^{-2} , conforme a superfície de resposta apresentada na Figura 7A. Os resultados apresentaram efeito quadrático significativo ($1p < 0,01$) para as lâminas de irrigação e densidades de plantas para esta variável nos plantios convencional e direto. Resultados superiores foram encontrados em trabalho realizado por Silva et al. (2013), avaliando o feijão-caupi em Serra Talhada, PE, sob regime irrigado, onde os autores obtiveram CV de 17,7 cm para a cultivar BRS-Itaim.

Valores de comprimento de vagem abaixo de 13,6 cm foram obtidos com lâminas inferiores a 180 mm e densidade de 15 plantas m^{-2} . Corroborando com estes resultados, Oliveira et al. (2011), avaliando a resposta do feijão-caupi, cultivar BRS Novaera sob diferentes lâminas de irrigação, no cerrado de Roraima, encontraram valores de comprimento de vagens entre 12 e 13 cm na lâminas de 187 e 273 mm, respectivamente. Esta redução nos valores de CVg pode ser explicada devido à baixa disponibilidade hídrica, causando diminuição no crescimento das

plantas, baixa produção de fotoassimilados e, conseqüentemente, vagens de menor comprimento.

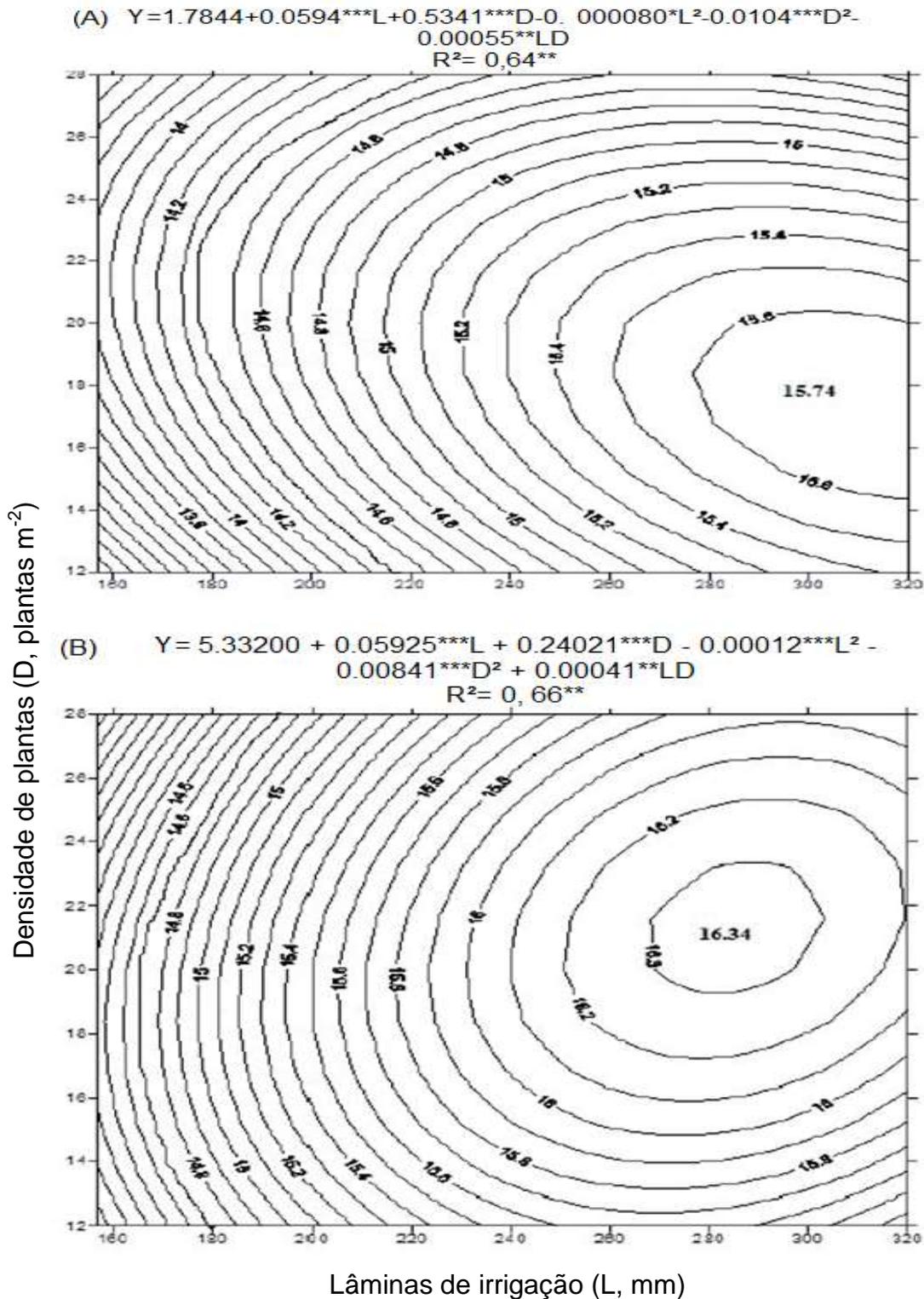


Figura 7. Superfícies de resposta do comprimento de vagens por planta (cm), do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, com diferentes níveis de irrigação e densidade de plantas em sistemas de plantio convencional (A) e direto (B). Teresina, PI, 2016

No plantio direto, o maior valor de CVg foi de 16,34, na densidade de 21 plantas m^{-2} , porém com uma lâmina menor, de 285 mm em relação ao PC cuja lâmina que proporcionou maior CVg foi de 312 mm Figura 7B.

Tem-se constatado que as lâminas que maximizam os valores das variáveis são menores no plantio direto em relação ao plantio convencional, fato explicado em decorrência da maior retenção de água no solo cultivado sob resíduos culturais. Os menores valores de comprimento de vagem (abaixo de 14,6 cm), para o sistema de plantio direto foram obtidos com as lâminas inferiores a 180 mm, na maioria das densidades de plantas. Isso comprova que também há efeito negativo do déficit hídrico sobre o comprimento de vagem, uma vez que, nesta condição, há fechamento dos estômatos, menor produção de fotoassimilados e, conseqüentemente, redução do tamanho desta variável.

Em sistema de cultivo irrigado, Silva et al. (2016) avaliando rendimento de grãos secos e componentes de produção de feijão-caupi, em Roraima, Boa Vista, observaram acréscimos nos valores de CV variando de 16 a 22 cm com lâmina de irrigação superior ao utilizado neste trabalho, no valor de 360 mm. Freitas et al. (2013) na região de Mossoró, RN, observaram que os sistemas de plantio direto e convencional influenciam nos componentes de produção: comprimento de vagem, número de grãos por vagem, número de grãos por planta e produtividade de grãos.

O maior valor de produtividade de grãos no plantio convencional foi de 1.166,36 $kg\ ha^{-1}$ com a lâmina entre 302 a 320 mm e densidade entre 15 a 28 plantas m^{-2} , Figura 8A. Os resultados apontam que existe uma combinação de lâmina de irrigação e densidade de plantas que proporciona maiores valores de produtividade de grãos do feijão-caupi neste sistema de plantio. Provavelmente, o plantio convencional, por proporcionar uma maior evaporação de água no solo, requer maior lâmina de irrigação. A densidade de 28 plantas m^{-2} foi a que proporcionou maior número de vagens por área e, conseqüentemente, maior produtividade de grãos.

Resultados superiores ao deste trabalho foram encontrados por Oliveira et al. (2015) avaliando a interação entre níveis de água e densidades de plantas no crescimento e produtividade de feijão-caupi, em Teresina, PI, em plantio convencional, onde estes alcançaram produtividade de grãos de 1.668,86 $kg\ ha^{-1}$, com lâmina de 390,88 mm e densidade de 24,1 plantas m^{-2} , com a cultivar BRS Itaim.

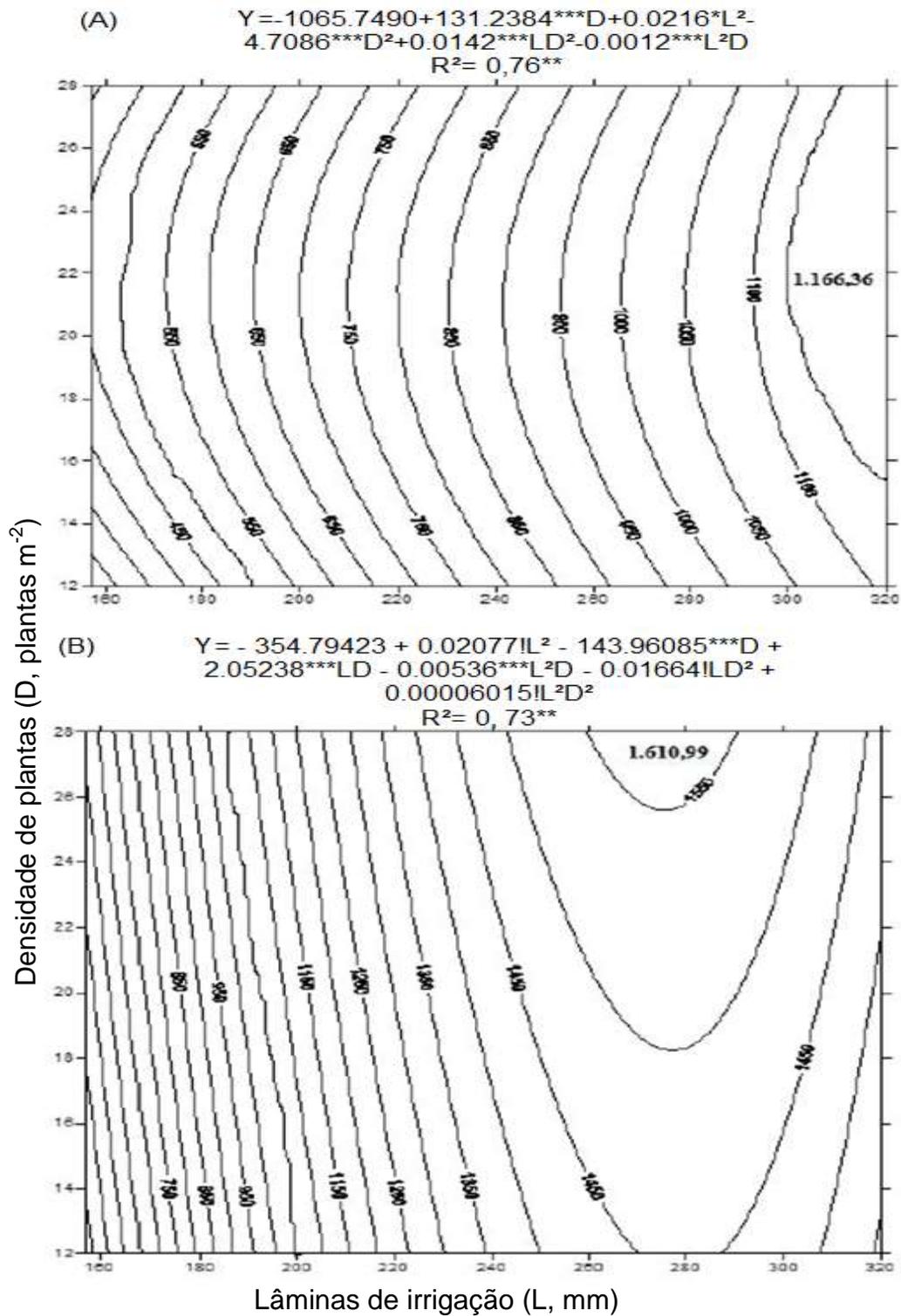


Figura 8. Superfície de resposta da produtividade de grãos (kg ha⁻¹) do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, com a aplicação de níveis de irrigação e densidade de plantas, em sistemas de plantio convencional (A) e direto (B). Teresina, PI, 2016

Souza et al. (2011) avaliando o feijão-caupi no semiárido de Petrolina, PE, em plantio convencional a maior produtividade de grãos ($1.376,9 \text{ kg ha}^{-1}$) foi obtida com lâmina de 449 mm, 29% superior à deste estudo.

Silva et al. (2016) avaliando rendimento de grãos secos e componentes de produção de feijão-caupi em Roraima, Boa Vista, obtiveram acréscimos de 30.4%, com valores variando de 886,72 a 1274,06 kg ha^{-1} na produtividade de grãos, com a lâmina de irrigação de 360 mm, em plantio convencional.

No sistema plantio direto, o maior valor de produtividade foi de 1.610,99 kg ha^{-1} , na densidade de 28 plantas m^{-2} , e lâmina de 270 mm, Figura 8B. Os resultados indicam que o aumento na lâmina de irrigação promoveu incremento na produtividade de grãos até o limite máximo de 270 mm. Os resíduos culturais da braquiária e sorgo utilizados no plantio direto favoreceram na redução das perdas de água por evaporação, o que foi observado devido a maior eficiência do uso da água nesse sistema, de forma que, o componente de produção número de vagens por área foi o mais influenciado, sendo necessário menor volume de água para atingir maiores produtividades de grãos.

Resultados superiores ao desta pesquisa foram encontrados por Tagliaferre et al. (2013) em trabalhos realizados com o feijão-caupi, variedade Guariba em função de lâminas de irrigação em Vitória da Conquista, BA. Estes autores observaram comportamento quadrático alcançando a máxima produtividade de grãos 2.820,03 kg ha^{-1} com a lâmina de 462 mm, corroborando com Locatelli et al. (2014) que avaliando o feijão-caupi em um Latossolo Amarelo do cerrado de Roraima, em plantio direto, observaram que a produtividade de grãos secos foi influenciada pelas lâminas de irrigação aplicadas.

Valores de produtividade de grãos inferiores a 800 kg ha^{-1} , para o sistema de plantio direto foram obtidos com lâminas inferiores a 180 mm, associados, praticamente, a todas as densidades de plantas. Pode-se constatar (Figuras 8A e 8B) que a lâmina de 180 mm, considerada como lâmina de déficit hídrico, proporcionou diferentes produtividades de grãos nos dois sistemas de cultivo.

Bezerra et al. (2014) avaliaram a morfofisiologia e produção de feijão-caupi, BRS Novaera, em função da densidade de plantas em Alvorada do Gurguéia, PI, sob regime irrigado, e alcançaram rendimento de grãos de 1.274,91 e 509,35 kg ha^{-1} nas populações de 100 mil e 500 mil plantas ha^{-1} , respectivamente. Este efeito negativo do adensamento na produtividade é justificado pela ocorrência do maior

sombreamento das partes mediana e inferior do dossel o que reduz a porcentagem de radiação efetiva interceptada e a eficiência do processo fotossintético.

Em relação à eficiência do uso da água (EUA) o maior valor obtido no plantio convencional (PC) foi de $4,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-3}$, obtida com lâminas abaixo da U.C (279 mm) e densidade de 21 plantas m^{-2} Figura 9A. Valores de eficiência do uso da água no PC (abaixo de $2,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-3}$) foram obtidos com lâminas abaixo do PMP (200 mm) e densidades de 14 a 19 plantas m^{-2} .

O máximo valor de eficiência do uso da água (EUA) no plantio direto (PD) foi de $6,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-3}$ podendo ser obtido com lâminas de 242 mm e densidade de 28 plantas m^{-2} , (Figura 9B), corroborando com o resultado de Andrade Júnior et al. (2002) que, avaliando a eficiência do uso da água para o feijão-caupi, observaram resposta quadrática com máxima EUA de $6,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-3}$ na lâmina 306,3 mm e 75% da ETo. Valores superiores a $6,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-3}$ foram encontrados por Locatelli et al. (2014) que, avaliando a eficiência do uso da água em cultivares de feijão-caupi, observaram resposta quadrática com a máxima EUA para BRS Guariba ($9,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-3}$), BRS Novaera ($10,04 \text{ kg m}^{-3}$) e BRS Pajeú ($13,94 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-3}$), com a lâmina de 30% da ETo (107,3 mm) alcançando produtividades de $1.190,67 \text{ kg ha}^{-1}$ com o BRS Guariba, $1.113,60 \text{ kg ha}^{-1}$ com o BRS Novaera e $1.545,7 \text{ kg ha}^{-1}$ com o BRS Pajeú.

Os menores valores de eficiência do uso da água (Figura 9B) são obtidos com lâminas abaixo do PMP (180 mm) e densidades superiores a 14 plantas m^{-2} . Constata-se que, tanto no plantio convencional como no direto, as menores EUA ocorreram nas lâminas sob deficiência hídrica, abaixo de 200 mm. Isso ocorre porque, sob déficit hídrico, as plantas fecham os estômatos, reduz a produção de fotoassimilados e, conseqüentemente, reduz a produtividade de grãos.

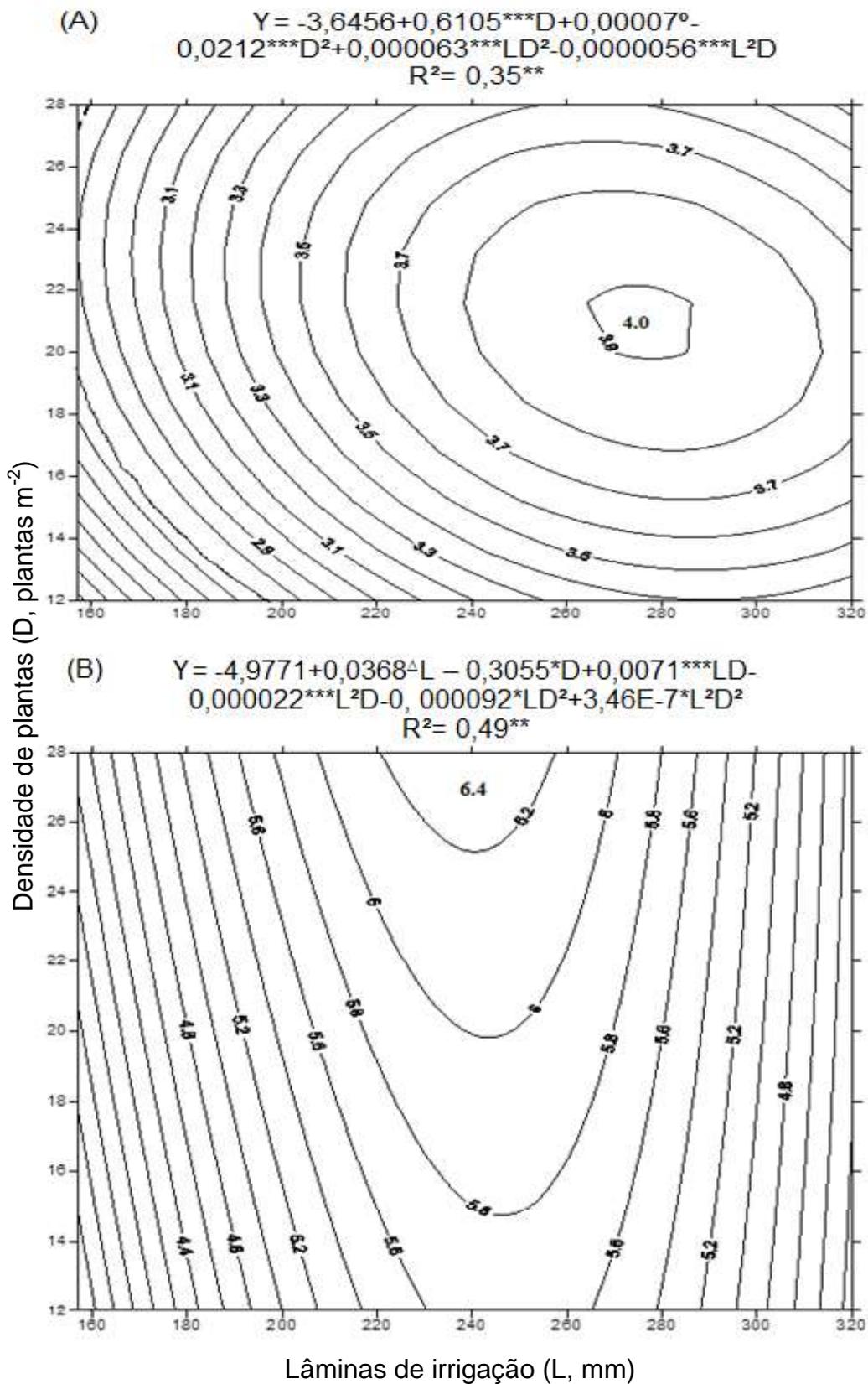


Figura 9. Superfícies de resposta da eficiência do uso da água ($\text{kg ha}^{-1} \text{m}^{-3}$), do feijão-caupi, BRS Itaim, com a aplicação de níveis de irrigação e densidade de plantas em plantio convencional (A) e direto (B). Teresina, PI, 2016

4.3 Variáveis fisiológicas (índice de área foliar, fotossíntese, condutância estomática, transpiração e eficiência instantânea do uso da água)

Os resultados mostram que houve efeito significativo de lâmina e interação para as avaliações aos (45 e 52 dias após a semeadura) no plantio convencional. No plantio direto, houve efeito significativo apenas de lâminas nas mesmas datas e estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Resumo da análise de variância do feijão-caupi cultivar BRS Itaim, para os índices de área foliar aos 45 dias (IAF45) e 52 dias (IAF52) após a semeadura das plantas, em plantio convencional e direto. Teresina, PI, 2016

| FV | GL | Quadrados médios ¹ | | | |
|-----------------|----|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | Plantio convencional | | Plantio direto | |
| | | IAF45 | IAF52 | IAF45 | IAF52 |
| BL | 3 | 0,26772* | 0,03878 ^{ns} | 0,02788 ^{ns} | 0,08607 ^{ns} |
| LAM | 4 | 1,23541** | 4,2836** | 7,04108** | 9,4248** |
| Erro (a) | 12 | 0,06239 | 0,36525 | 0,10279 | 0,10864 |
| DENS | 4 | 0,07317 ^{ns} | 0,45316** | 0,66354** | 0,19899* |
| LAM*DENS | 16 | 0,22843** | 0,27005** | 0,15481** | 0,19472** |
| Erro (b) | 60 | 0,03465 | 0,0836 | 0,04825 | 0,06736 |
| CV (a) | | 8,55 | 19,00 | 9,37 | 9,61 |
| CV (b) | | 6,37 | 9,08 | 642 | 7,56 |

Níveis de significância pelo teste "F": *: significativo a ($0,01 < p \leq 0,05$); **: significativo a ($p \leq 0,01$); ns: não significativo a ($p > 0,05$)

Nas Tabelas 7 e 8 encontram-se as análises de variância para fotossíntese (A), condutância estomática (gs), transpiração (E) e eficiência instantânea do uso da água (EiUA). Para o plantio convencional (Tabela 7) verifica-se que houve interação entre regimes hídricos (com e sem deficiência hídrica) correspondentes às lâminas (135 e 239 mm) e densidades de plantas somente para fotossíntese e eficiência instantânea do uso da água e efeito isolado dos regimes hídricos para condutância estomática e transpiração. No plantio direto (Tabela 8) houve efeito isolado dos regimes hídricos sobre a fotossíntese, condutância estomática e transpiração.

Tabela 7. Resumo da análise de variância do feijão-caupi cultivar BRS Itaim, para à fotossíntese (A), condutância estomática (gs), transpiração (E) e eficiência instantânea do uso da água (EiUA) aos 55 dias após a semeadura, em plantio convencional. Teresina, PI, 2016

| FV | GL | Quadrados Médios | | | |
|----------|----|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| | | A | gs | E | EiUA |
| BL | 3 | 15,335 ^{ns} | 0,00483 ^{ns} | 2,4221 ^{ns} | 1,75331 ^{ns} |
| LAM | 1 | 498,009** | 0,29675** | 44,9217** | 8,96889* |
| Erro (a) | 3 | 8,258 | 0,00467 | 0,4932 | 0,88469 |
| DENS | 4 | 11,472 ^{ns} | 0,00254 ^{ns} | 0,0788 ^{ns} | 1,02797** |
| LAM*DENS | 4 | 21,596* | 0,00774 ^{ns} | 0,1447 ^{ns} | 1,17138** |
| Erro (b) | 24 | 5,712 | 0,00352 | 0,2749 | 0,06109 |
| CV (a) | | 11,07 | 17,08 | 11,72 | 20,14 |
| CV (b) | | 9,21 | 14,75 | 8,75 | 5,30 |

Níveis de significância pelo teste "F": *: significativo a (0,01 < p ≤ 0,05); **: significativo a (p ≤ 0,01); ns: não significativo a (p > 0,05)

Tabela 8. Resumo da análise de variância do feijão-caupi cultivar BRS Itaim, para à fotossíntese (A), condutância estomática (gs), transpiração (E) e eficiência instantânea do uso da água (EiUA) aos 55 dias após a semeadura, em plantio direto. Teresina, PI, 2016

| FV | GL | Quadrados Médios | | | |
|----------|----|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| | | A | gs | E | EiUA |
| BL | 3 | 26,054 ^{ns} | 0,01610 ^{ns} | 2,5375 ^{ns} | 0,44527 ^{ns} |
| LAM | 1 | 537,934** | 1,04976** | 61,7398** | 0,37636 ^{ns} |
| Erro (a) | 3 | 14,408 | 0,01813 | 1,6138 | 0,07223 |
| DENS | 4 | 11,081 ^{ns} | 0,00943 ^{ns} | 0,6628 ^{ns} | 0,12145 ^{ns} |
| LAM*DENS | 4 | 31,997 ^{ns} | 0,00618 ^{ns} | 1,0093 ^{ns} | 0,03931 ^{ns} |
| Erro (b) | 24 | 11,729 | 0,00877 | 1,0678 | 0,08928 |
| CV (a) | | 14,85 | 32,06 | 17,79 | 7,50 |
| CV (b) | | 13,40 | 22,13 | 14,46 | 8,34 |

Níveis de significância pelo teste "F": *: significativo a (0,01 < p ≤ 0,05); **: significativo a (p ≤ 0,01); ns: não significativo a (p > 0,05)

4.3.1 Índice de área foliar

O maior valor do índice de área foliar aos 45 dias após a semeadura no plantio convencional foi de 3,35 com lâmina de 205 mm e densidade de 24 plantas m⁻², (Figura 10A).

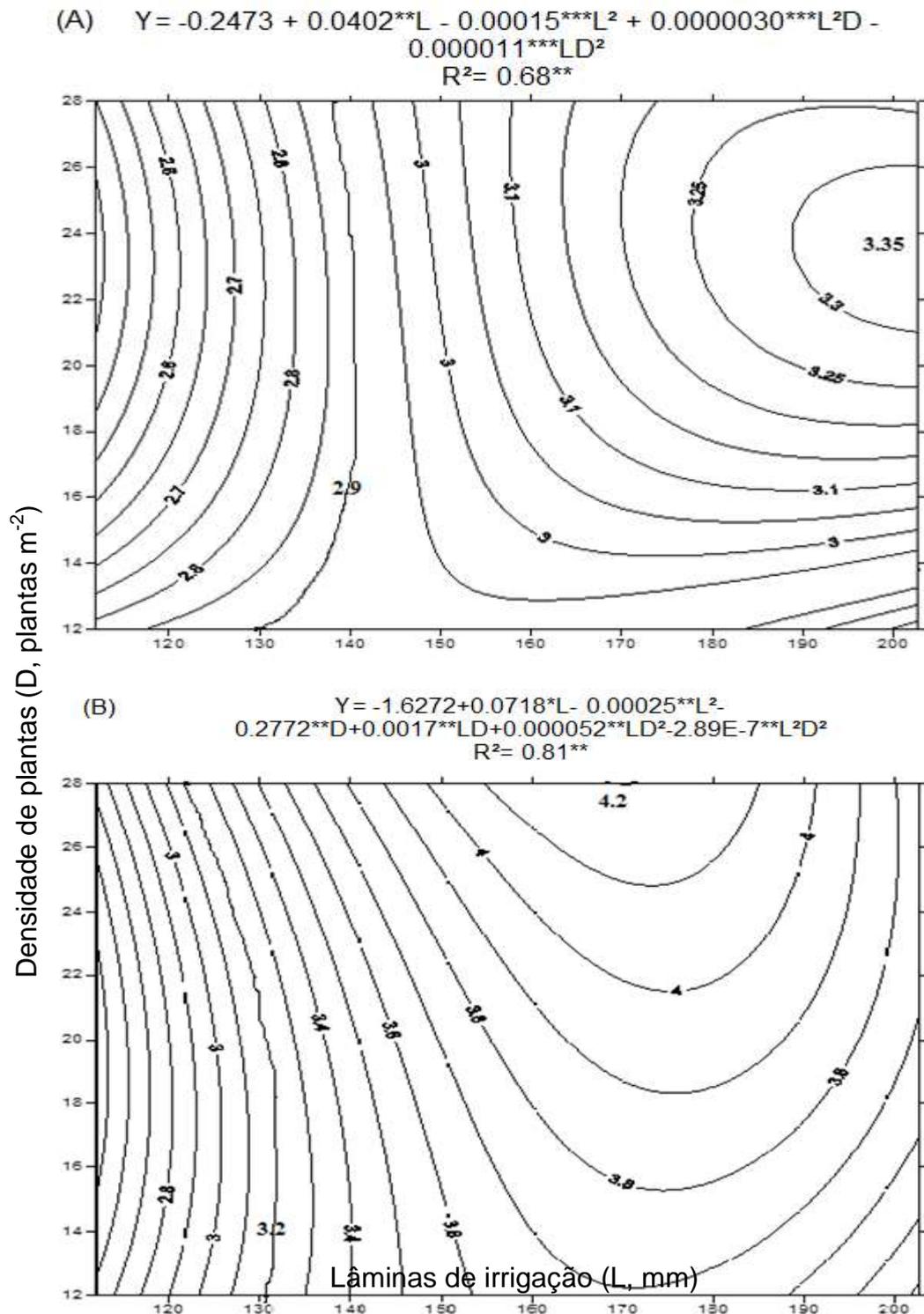


Figura 10. Superfícies de resposta do índice de área foliar, do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, aos 45 DAS, com a aplicação de níveis de irrigação e densidade de plantas em sistemas de plantio convencional (A) e direto (B). Teresina, PI, 2016

No plantio direto o maior valor encontrado foi de 4,2 com lâmina de 170 mm e densidade de 28 plantas m^{-2} , (Figura 10B). Um índice de área foliar acima de 3 representa o máximo desenvolvimento do dossel para o feijão-caupi, possibilitando maior interceptação de luz solar, resultando em maior taxa fotossintética líquida (SUMMERFIELD, 1985), corroborando com Bastos et al. (2002) que observaram índice de área foliar variando de 3 a 4,3 para a variedade de caupi BR 14-Mulato e 3 para BR17-Gurguéia aos 47 dias após a semeadura. Resultados superiores foram observados por Bastos et al. (2011) avaliando a identificação de genótipos de feijão-caupi tolerantes à seca, que verificaram um índice de área foliar de 5,0 para o genótipo BRS Paraguaçu sob condições de irrigação total, considerados altos devido à suplementação foliar de macro e micronutrientes durante o cultivo, promovendo assim uma maior expansão da área foliar.

Observa-se que tanto no plantio convencional como no plantio direto, os menores valores do IAF são obtidos com lâminas inferiores a 130 mm e densidades superiores a 12 plantas m^{-2} , podendo-se inferir que o IAF é mais influenciado pela deficiência hídrica do que pela densidade de plantas. De acordo com Correia e Nogueira (2004) a redução da área foliar quando é submetido um déficit hídrico em plantas pode resultar em uma estratégia de sobrevivência para reduzir a área disponível para transpiração. A redução na área foliar é um mecanismo de defesa morfológica, haja vista que, havendo redução da interface água-planta-atmosfera há diminuição da transpiração, reduzindo as taxas de assimilação fotossintética e prejudicando o rendimento da planta.

Aos 52 dias após a semeadura o maior valor do índice de área foliar encontrado no plantio convencional foi de 4,0 com lâmina de 254 mm e densidade de 21 plantas m^{-2} , (Figura 11A). Os menores valores do IAF são obtidos com lâminas inferiores a 135 mm e densidades superiores a 12 plantas m^{-2} .

No plantio direto, o maior valor do índice de área foliar aos 52 dias após a semeadura no plantio direto foi de 4,3, com lâmina de 254 mm e densidade de 27 plantas m^{-2} , (Figura 11B). Os menores valores do IAF são obtidos com lâminas inferiores a 140 mm e densidades superiores a 12 plantas m^{-2} . De acordo com Oliveira e Silva (1990) o IAF do feijoeiro irrigado cresce com o desenvolvimento da cultura, atingindo valor máximo, em torno de 55 dias após a emergência, o que corresponde ao final da floração e início da formação das vagens.

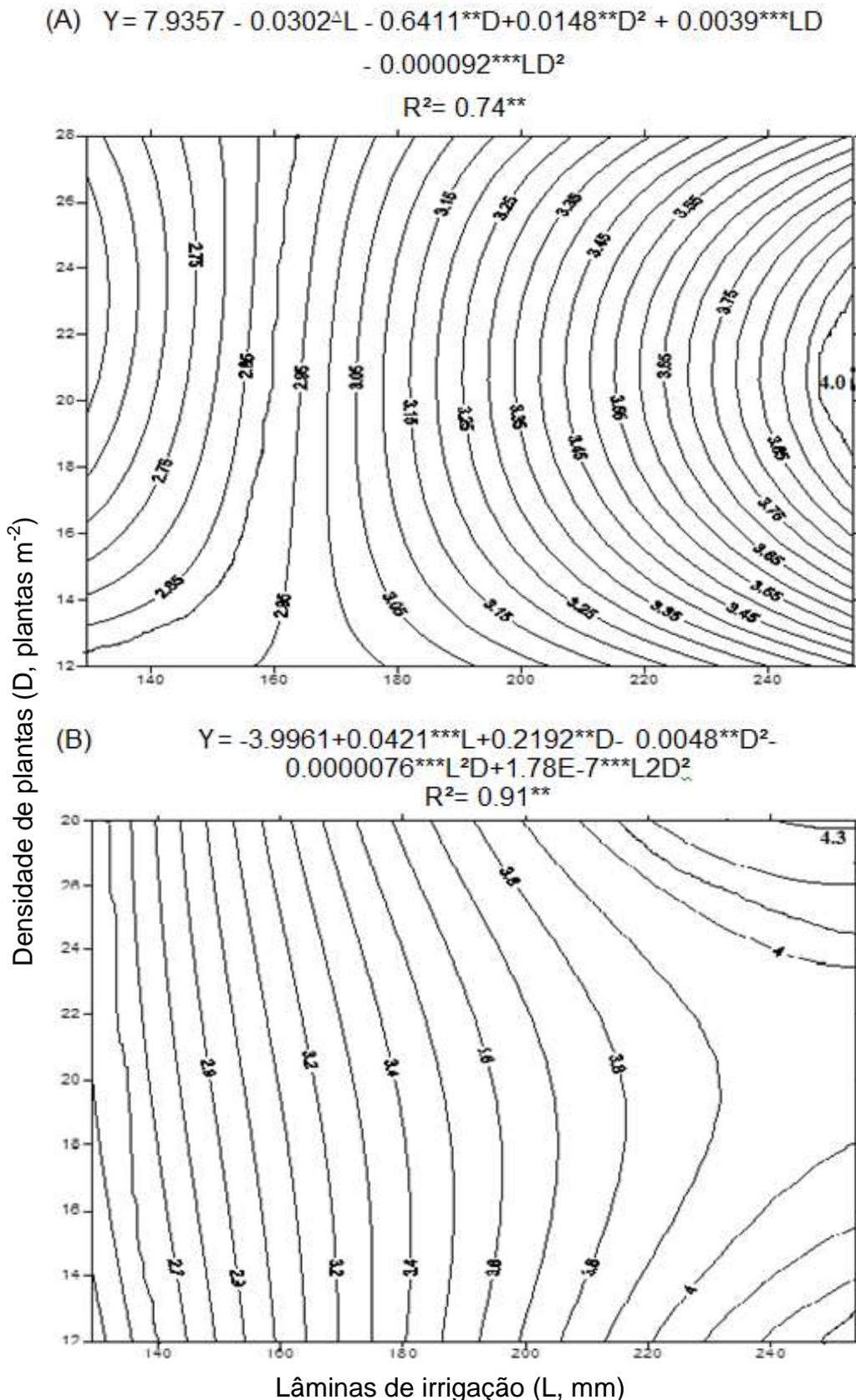


Figura 11. Superfícies de resposta do índice de área foliar, do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, aos 52 DAS, com a aplicação de níveis de irrigação e densidade de plantas em sistemas de plantio convencional (A) e direto (B). Teresina, PI, 2016

4.3.2 Fotossíntese

O maior valor de fotossíntese aos 55 dias após a semeadura no plantio convencional foi de $30,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, obtido com lâmina de 235 mm e densidade de 18 plantas m^2 (Figura 12). Resultado semelhante foi constatado por Oliveira (2013), avaliando a densidade populacional do feijão-caupi sob níveis de irrigação em Teresina, PI, observou que a maior taxa fotossintética foi obtida com a lâmina máxima aplicada (393,53 mm) de $29 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Constatou ainda que, a máxima produtividade de grãos ($1.668,86 \text{ kg ha}^{-1}$) foi obtida com a lâmina de irrigação de 390,88 mm.

Nesta figura (12), constata-se que os menores valores de fotossíntese são obtidos com lâminas inferiores a 150 mm e densidades inferiores a 14 plantas m^{-2} , demonstrando o efeito deletério do déficit hídrico sobre a fotossíntese. Vários autores obtiveram resultados semelhantes em feijão-caupi, constatando que, sob deficiência hídrica, a fotossíntese tende a diminuir (FRANÇOIS, 2012; OLIVEIRA, 2013; SILVA, 2014 e SOUZA et al., 2016). De acordo com Mariano et al. (2009), isso é justificado porque, se a disponibilidade de água para as plantas é reduzida, há uma diminuição nos valores de condutância estomática e de transpiração por causa do fechamento estomático, e, como consequência, tem-se redução nas taxas de fotossíntese.

Cabe ressaltar que os valores de fotossíntese obtidos neste trabalho são concordantes com os valores máximos obtidos por Fernandes et al. (2015) e François (2012) para o feijão-caupi, que foram de $28 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e $26,77 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente, em cultivo sob as condições do semiárido. Valores similares também foram relatados por Oliveira (2013) ao avaliar o efeito de lâminas de irrigação e de densidades de plantas em feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, em Teresina, PI, no qual os máximos valores obtidos foram de $26 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, para a lâmina de 340 mm (125% da ETo) e de $29 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, para a lâmina de 393 mm (150% da ETo).

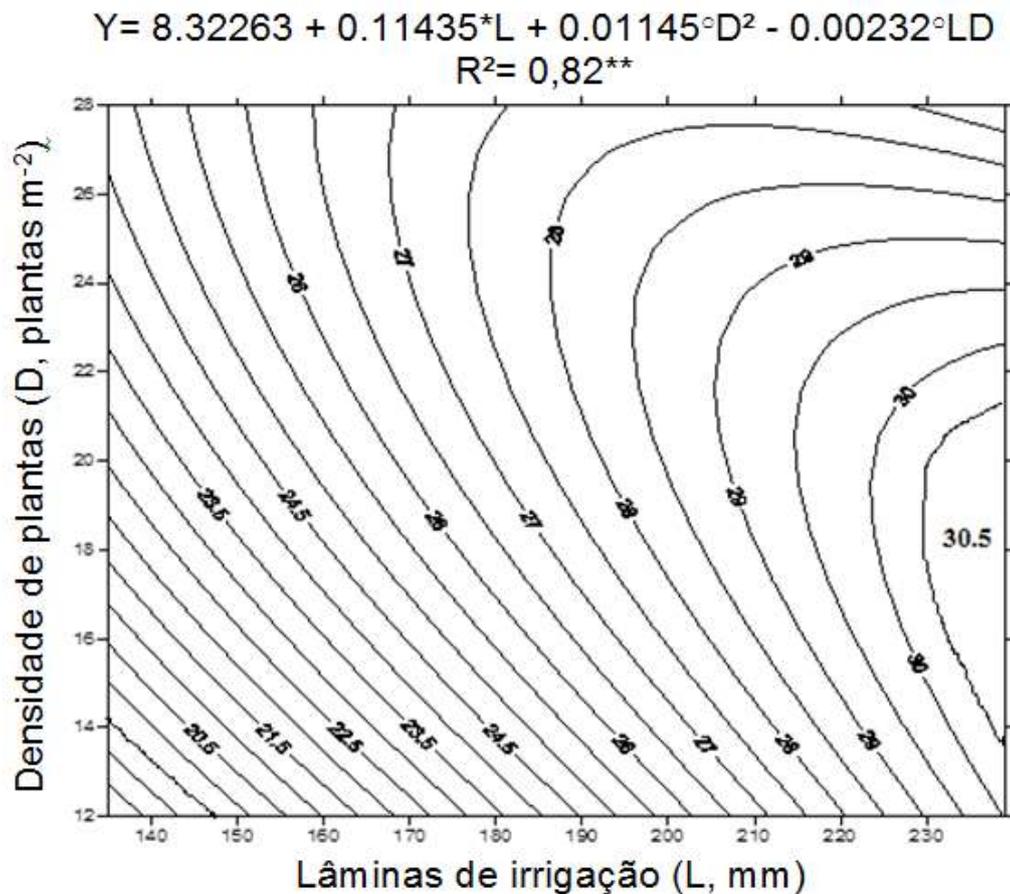


Figura 12. Superfícies de resposta da fotossíntese ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), no feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, aos 55 DAS, com a aplicação de níveis de irrigação e densidade de plantas no plantio convencional. Teresina - PI, 2016

Para o plantio direto, a densidade de plantas não teve efeito sobre a fotossíntese, verificando-se apenas efeito de lâminas de irrigação com médias de 22 e 29 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ nas lâminas de 135 e 239 mm, respectivamente, Figura 13. Observou-se, que o aumento da lâmina de irrigação promoveu um efeito mais pronunciado no aumento da taxa fotossintética do que o do aumento na densidade de plantas. Este fato pode ser explicado devido à maior resposta da abertura estomática ao aumento da disponibilidade hídrica do solo, proporcionada pela irrigação. Provavelmente, a variação da densidade de plantas não proporcionou alterações sobre fatores ambientais próximo às plantas, como luz, temperatura, concentração de CO_2 e de nutrientes, que segundo TAIZ e ZEIGER (2013) afetam diretamente a fotossíntese. De acordo com Floss (2004), cerca de 90% da produção biológica das plantas ocorre em resposta à atividade fotossintética. Deste modo, aumentos na atividade fotossintética tem reflexo direto no aumento de produtividade das culturas.

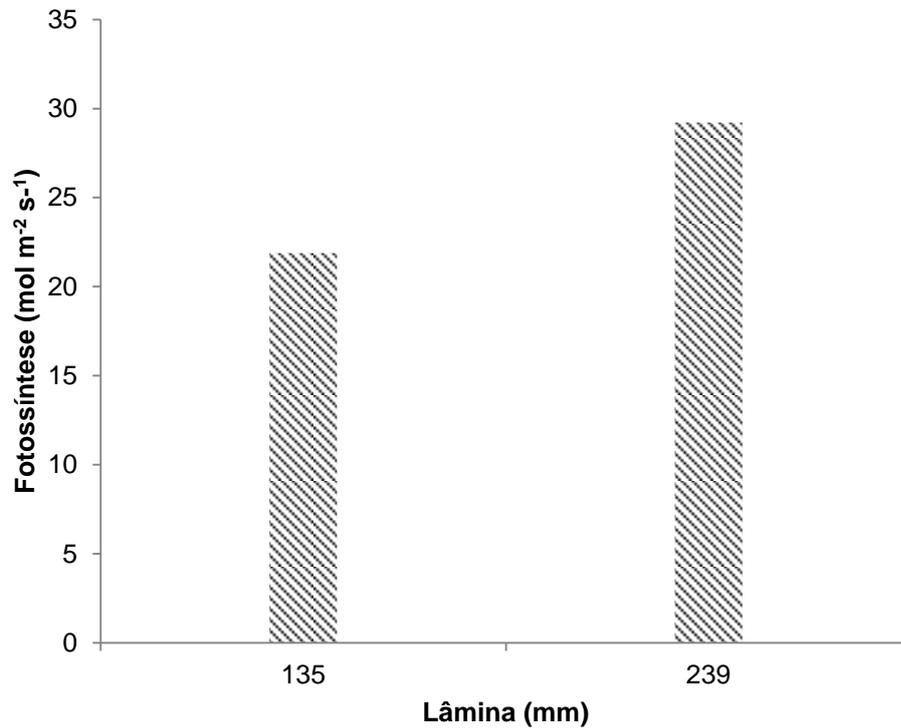


Figura 13. Fotossíntese ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, aos 55 DAS, sob dois regimes hídricos (50 e 125% ETc), no plantio direto. Teresina-PI, 2016

4.3.3 Condutância estomática (gs)

A condutância estomática, tanto no plantio convencional como no plantio direto, não teve efeito da densidade de plantas, observando-se apenas efeito de lâminas de irrigação (Tabelas 7 e 8, respectivamente).

No plantio convencional, aos 55 dias após a semeadura, a condutância estomática apresentou incrementos à medida que se aumentou os níveis de irrigação com valores médios de ($0,3162 \text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e ($0,4885 \text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) obtidos nas lâminas de 135 mm (50% ETc) e 239 mm (125% ETc), respectivamente (Figura 14), semelhante aos resultados obtidos por Dutra et al. (2015) que obtiveram, para as cultivares BRS Guariba e BRS Marataoã, incrementos de 17% e 15% na condutância estomática, com o aumento na reposição das lâminas, em relação aos valores obtidos com 100% da ETo ($0,453$ e $0,352 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

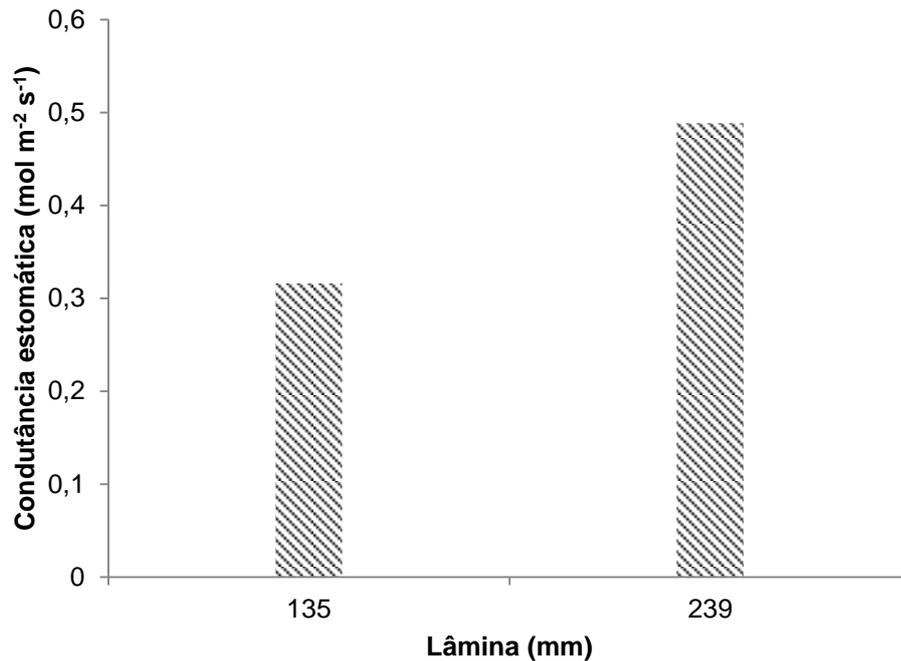


Figura 14. Condutância estomática do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, aos 55 DAS, sob dois regimes hídricos (50 e 125% ETc), no plantio convencional. Teresina, PI, 2016

No plantio direto, a tendência foi à mesma, constatando-se um incremento da condutância estomática de $0,261 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para $0,585 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ à medida que se aumentou a lâmina de irrigação de 135 mm para 239 mm (Figura 15). Oliveira et al. (2005); Nascimento (2009); Oliveira (2013); Fernandes et al. (2015) e Souza et al. (2017) também observaram aumento da condutância estomática em feijão-caupi com o incremento da quantidade de água aplicada. Isso é justificado porque a condutância estomática, assim como a fotossíntese, tende a aumentar à medida que eleva a disponibilidade hídrica para as plantas uma vez que, segundo Dutra et al. (2015) as entradas e saídas de CO_2 e água nas folhas são reguladas pela abertura ou fechamento estomático.

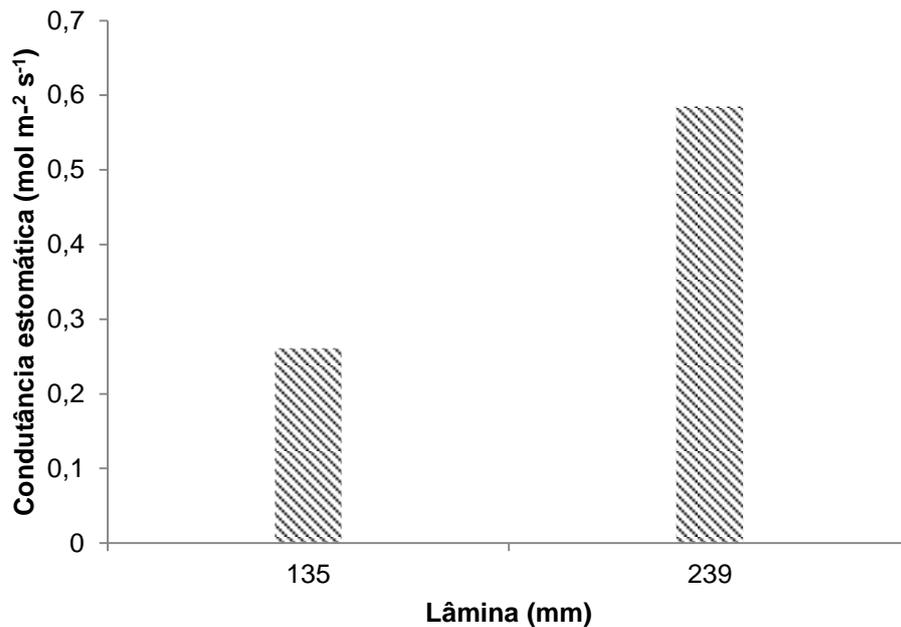


Figura 15. Condutância estomática do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, aos 55 DAS, sob dois regimes hídricos (50 e 125% ETc), no plantio direto. Teresina, PI, 2016

4.3.4 Transpiração

As taxas de transpiração, tanto no plantio convencional como no plantio direto, não apresentaram efeito da densidade de plantas, observando-se apenas efeito de lâminas de irrigação de acordo com as Figuras 16 e 17, respectivamente.

No plantio convencional, aos 55 dias após a semeadura, a taxa de transpiração apresentou valores de média de (4,9305 molm⁻²s⁻¹) e (7,0500 molm⁻²s⁻¹) nas lâminas de 135 mm (50% ETc) e 239 mm (125% ETc), respectivamente (Figura 16). Diversos autores também constataram redução da transpiração em feijão-caupi à medida que diminuía a lâmina de irrigação. Esses resultados podem ser explicados porque a transpiração segue a mesma tendência da fotossíntese e da condutância estomática, ou seja, à medida que aumenta a deficiência hídrica no solo, ocorre o fechamento dos estômatos como mecanismo natural de redução de perda de água pelas plantas. François (2012), estudando as relações hídricas e trocas gasosas em plantas de feijão-caupi submetidas à irrigação deficitária constatou que a taxa de transpiração das plantas de feijão diminuiu linearmente com

a redução da irrigação de 100% ($11,65 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) para 25% ($8,05 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) da ETo.

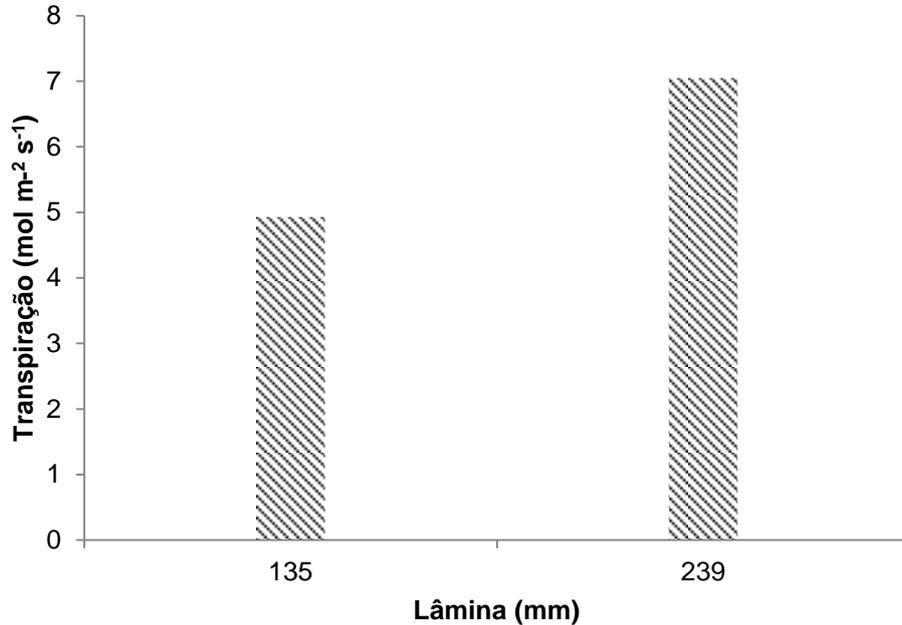


Figura 16. Transpiração do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, aos 55 DAS, sob dois regimes hídricos (50 e 125% ETc), no plantio convencional. Teresina, PI, 2016

No plantio direto, as taxas de transpiração foram ($5,9013 \text{ mol mm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $8,3860 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), nas lâminas de 135 mm (50% ETc) e 239 mm (125% ETc), respectivamente (Figura 17).

Silva et al. (2010), avaliando as trocas gasosas em plantas de feijão-caupi submetidas à deficiência hídrica, obtiveram taxas de transpiração de 7,78 e 7,40 $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ em plantas irrigadas com 100% e 50% da água perdida por evapotranspiração, porém quando estes autores aplicaram lâmina de 25%, encontraram taxas de transpiração inferiores a $1,3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

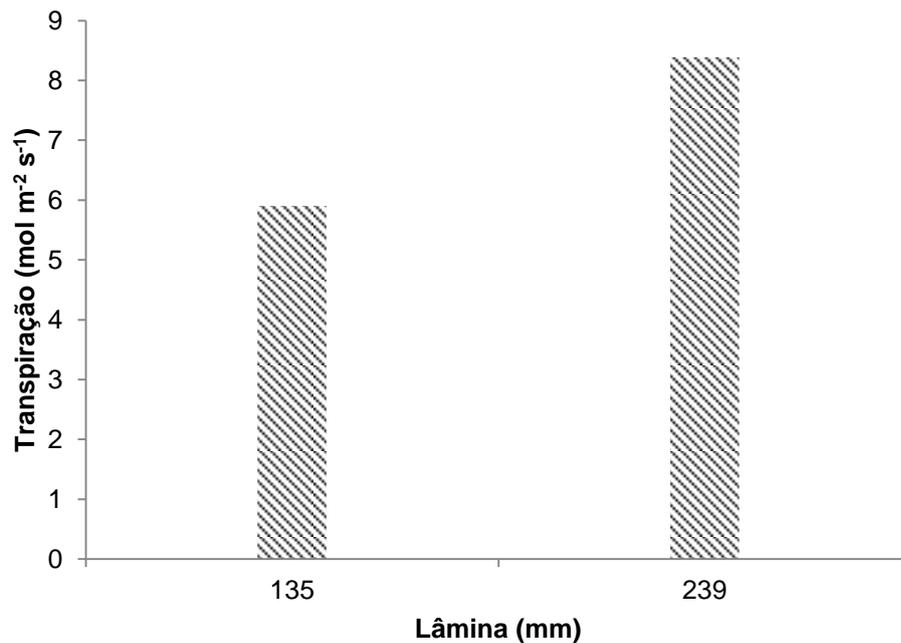


Figura 17. Transpiração do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, aos 55 DAS, sob dois regimes hídricos (50 e 125% ET_c), no plantio direto. Teresina, PI, 2016

4.3.5 Eficiência instantânea do uso da água (EiUA)

O maior valor da eficiência instantânea do uso da água (EiUA) do feijão-caupi aos 55 dias após a semeadura, no plantio convencional, foi de 5,8 [($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)], com a lâmina de 150 mm e densidades de 25 plantas m^{-2} (Figura 18). Constatou-se que, à medida que se aumentou a lâmina de irrigação, reduziu-se a EiUA, com valores de 4,3 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para as lâminas entre 220 e 239mm (Figura 18). Essa tendência pode ser justificada porque, segundo (TAIZ; ZEIGER, 2013), em condições de déficit hídrico nos estádios de crescimento inicial das plantas, os estômatos se fecham e a eficiência do uso da água pode aumentar, pois o fechamento estomático inibe a transpiração.

Desta forma, as plantas mobilizam e utilizam reservas para onde são necessárias quando o déficit hídrico é rigoroso e coloca em prática a capacidade de translocação dos fotoassimilados, corroborando com essa teoria, Souza et al. (2016), avaliando crescimento e trocas gasosas do feijão-caupi cv. BRS Pujante sob níveis de água disponível no solo e cobertura morta no solo sem cobertura morta, observaram que a eficiência do uso da água respondeu de forma linear decrescente

em função do aumento da água disponível com valor de $3,24 (\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1})^{-1}$.

Entretanto, resultados divergentes a estes são relatados na literatura. Silva (2014), avaliando componentes de produção e fisiológicos em ecótipos de *vigna* sob reposição hídrica, observou que a EiUA foi de $4,90 [(\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1})]$ com a lâmina de 100% da ETc e $3,78 [(\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1})]$ com a lâmina de 40% da ETc. Silva et al. (2010), avaliando as trocas gasosas em plantas de feijão-caupi submetidas à deficiência hídrica, obtiveram para EiUA o valor integrado diário de $2,42 \text{ mmol m}^{-2} \text{ dia}^{-1} / \text{mol m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, no tratamento com reposição de 100% da evapotranspiração, e $1,93 \text{ mmol m}^{-2} \text{ dia}^{-1} / \text{mol m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ no tratamento com reposição de 50%.

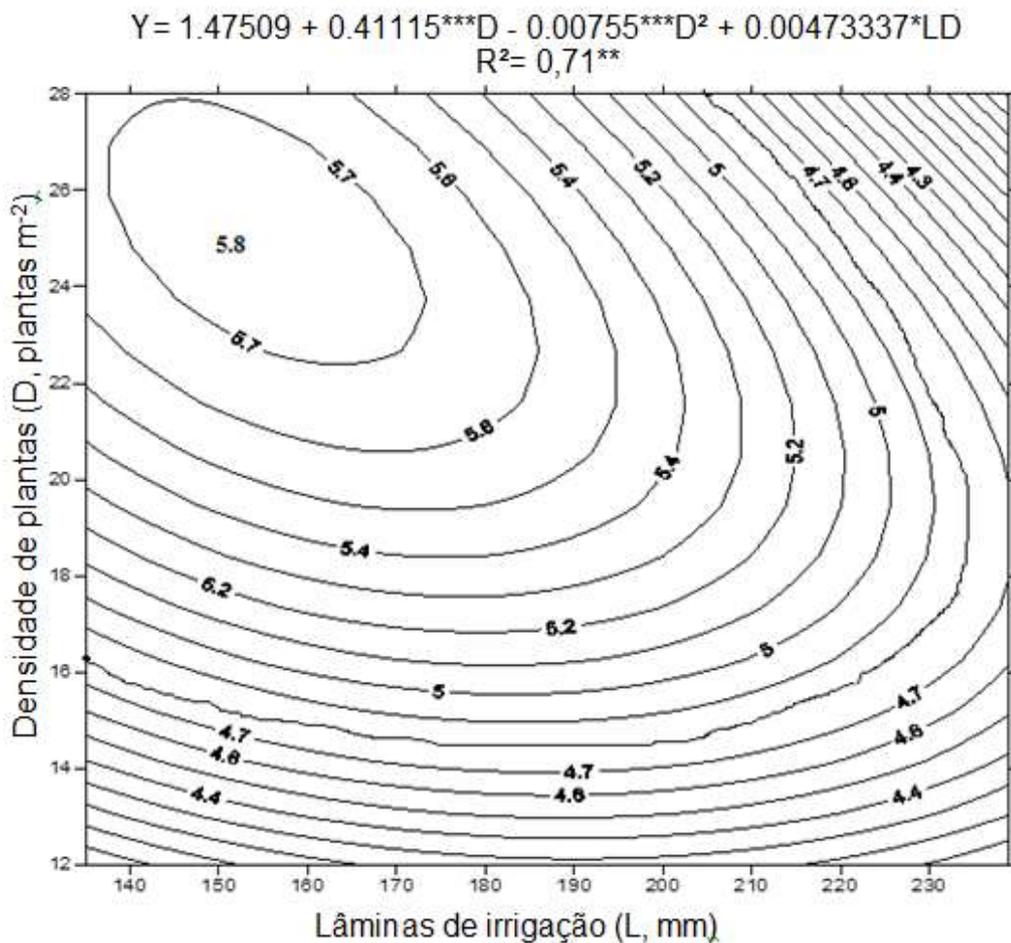


Figura 18. Superfícies de resposta da eficiência instantânea do uso da água $[(\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}) (\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1})]$, do feijão-caupi, cultivar BRS Itaim, aos 55 DAS, com a aplicação de níveis de irrigação e densidade de plantas no plantio convencional. Teresina, PI, 2016

No plantio direto, a eficiência instantânea do uso da água não apresentou interferência de lâmina de irrigação e nem da densidade de plantas (Tabela 8). O seu valor médio foi de 3,8 [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Provavelmente, isso se justifica porque o efeito do déficit hídrico sobre as plantas cultivadas em solos sob plantio direto é menor em relação àsquelas sob plantio convencional, uma vez que a palhada sobre o solo aumenta a retenção de água no solo.

5 CONCLUSÕES

1. Os componentes de produção e produtividade de grãos são afetados pela interação entre regimes hídricos e densidade de plantas.
2. No plantio convencional, a maior produtividade de grãos ($1.166,36 \text{ kg ha}^{-1}$) foi obtida na lâmina de 302 mm associada às densidades entre 16 a 28 plantas m^{-2} .
3. No plantio direto, a maior produtividade de grãos ($1.610,99 \text{ kg ha}^{-1}$) foi obtida com uma lâmina de 274 mm associada às densidades entre 27 a 28 plantas m^{-2} .
4. No plantio convencional, o índice de área foliar é afetado pela interação entre regimes hídricos e densidade de plantas, porém, no plantio direto, essa variável é mais afetada pelos regimes hídricos.
5. A fotossíntese, condutância estomática e transpiração são afetadas significativamente pelos regimes hídricos, reduzindo seus valores sob déficit hídrico.
6. A fotossíntese, condutância estomática e transpiração não são afetadas pela variação de densidade de plantas.
7. A eficiência instantânea do uso de água é maior quando se utiliza menor lâmina de irrigação.
8. A eficiência do uso da água foi maior no plantio direto.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J. M. A.; ARAÚJO, N. P.; UCHÔA, S. C. P.; ALBUQUERQUE, J. A. A.; SILVA, A. J.; RODRIGUES, G. S.; SILVA, D. C. O. Avaliação agroeconômica da produção de cultivares de feijão-caupi em consórcio com cultivares de mandioca em Roraima. **Revista Agroambiente**, v. 3, n. 1, p. 15-30, 2009.
- AZEVEDO, B. M.; FERNANDES, C. N. V.; PINHEIRO, J. A.; BRAGA, E. S.; CAMPÊLO, A. R.; VIANA, T. V. A.; CAMBOIM NETO, L. F.; MARINHO, A. B. Efeitos de lâminas de irrigação na cultura do feijão *vigna* de cor preta. **Agropecuária Técnica**, v. 32, n. 1, p 152–159, 2011.
- ANGUS, J. F.; HERWAARDEN, A. F. V. Increasing water use and water use efficiency in dryland wheat. **Agronomy Journal**, 93. p. 290-298, 2001.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage**. Paper 56. UN-FAO, Rome, 1998.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S.; RODRIGUES, B. H. N.; BASTOS, E. A. IRRIGAÇÃO. IN: CARDOSO, M. J. (Org.). **A cultura do feijão-caupi no Meio- Norte do Brasil**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, p. 127-154. Circular Técnica, 28, 2000.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S.; RODRIGUES, B. H. N. FRIZZONE, J. A.; CARDOSO, M. J.; BASTOS, E. A.; MELO, F. B. Níveis de irrigação na cultura do feijão-caupi. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 17-20, 2002.
- ARAÚJO, M. E. B. **Estratégias de irrigação deficitária no desempenho agrônomo de cultivares de feijão-caupi no litoral cearense**. 2014. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2014.
- BASTOS, E. A.; ANDRADE JUNIOR, A. S. Boletim agrometeorológico de 2015 para o município de Teresina, Piauí. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2015. (Documentos, 239).
- BEZERRA, A. A. C.; ALCÂNTARA NETO, F.; NEVES, A. C.; MAGGIONI, K. Comportamento morfoagronômico de feijão-caupi, cv. BRS Guariba, sob diferentes densidades de plantas. **Revista Ciências Agrárias**, v. 55, n. 3, p. 184-189, jul./set. 2012.
- BLANCO, F. F.; FOLEGATTI, M. V.; Estimation of leaf area for greenhouse cucumber by linear measurements under salinity and grafting. **Scientia Agricola**, v. 62, n. 4, p. 305-309, 2005.
- BIZARI, D. R.; MATSURA, E. E.; DEUS, F. P.; MESQUITA, M. Diferentes sistemas de manejo do solo no consumo de água do feijoeiro irrigado em campinas-sp. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 5, n. 3, p.143 -152, 2011.

BIZARI, D. R.; MATSURA, E. E.; ROQUE, M. W.; SOUZA, A. L. Consumo de água e produção de grãos do feijoeiro irrigado em sistemas plantio direto e convencional. **Ciência Rural**, Santa Maria: v. 39, p. 2073-2079, 2009.

BEZERRA, A. A. C.; NEVES, A. C.; ALCÂNTARA NETO, F. DE; SILVA JÚNIOR, J. V. DA. Morfofisiologia e produção de feijão-caupi, cv. BRS Novaera, em função da densidade de plantas. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 27, n. 4, p.135-141, out.–dez., 2014.

BASTOS, E. A.; NASCIMENTO, S. N.; SILVA, E. M.; FREIRE-FILHO, F. R.; GOMIDE, R. L. Identification of cowpea genotypes for drought tolerance. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 42, n. 1, p. 100-107, 2011.

BASTOS, E. A.; RODRIGUES, B. H. N.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; CARDOSO, M. J. Parâmetros de crescimento do feijão caupi sob diferentes regimes hídricos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 1, p. 43-50, 2002.

BASTOS, E. A.; RAMOS, H. M. M.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; NASCIMENTO, F. N.; CARDOSO, M. J. Parâmetros fisiológicos e produtividade de grãos verdes do feijão-caupi sob déficit hídrico. **Water Resources and Irrigation Management**, Teresina, PI, v. 1, n. 1, p. 31, Sept-Dec, 2012.

BERNARDO, S; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV. 625 p. 2008.

BEZERRA, A. A. DE C.; TÁVORA, F. J. F.; FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q. Características de dossel e de rendimento em feijão-caupi ereto em diferentes densidades populacionais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 10, p. 1239-1245, out. 2009.

BEZERRA, A. A. C; TÁVORA, F. J. A. F.; FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q. Morfologia e produção de grãos em linhagens modernas de feijão-caupi submetidas a diferentes densidades populacionais. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v. 08, n. 01, p. 85-93. 2008.

COELHO, J. B. M.; BARROS, M. F. C.; BEZERRA NETO, E.; CORREA, M. Comportamento hídrico e crescimento do feijão vigna cultivado em solos salinizados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.17, n. 4, p. 379–385, 2013.

CONAGIN, A.; JORGE, J. P. N. Delineamento (1/5) (5x5x5) em blocos. **Bragantia**, Campinas, v. 41, n. 16, p. 155-168. 1982.

CARDOSO, J. M.; MELO, F. B.; LIMA, M. G. Ecofisiologia e manejo de plantio. In: FREIRE FILHO, F. R.; LIMA, J. A. A.; RIBEIRO, V. Q. (Ed). **Feijão-caupi: Avanços tecnológicos**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p. 213 – 225, 2005 (a).

CARDOSO, M. J.; MELO, F. de B.; LIMA, M. G. Ecofisiologia e manejo de plantio. In: FREIRE FILHO, F. R.; LIMA, J. A. A.; RIBEIRO, V. Q. (Ed.). **Feijão-caupi: avanços tecnológicos**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p. 212-228, 2005 (b).

CUSTÓDIO, T. N.; MORAIS, A. R.; MUNIZ, J. A. Superfície de resposta em experimento com parcelas subdivididas. **Ciência Agrotecnologia**, Lavras, v. 24, n. 4, p. 1008-1023, out/dez., 2000.

CUNHA, J. L. X. L.; NASCIMENTO, P. G. M. L.; MESQUITA, H. C.; SILVA, M. G. O.; DOMBROSKI, J. L. D.; SILVA, I. N.; Comparação de Métodos de Área Foliar em *Chrysobalanus icaco* L. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 6, n. 3, p. 22-27, 2010.

CORREIA, G. K.; NOGUEIRA, C. M. J. R. Avaliação do crescimento do amendoim (*Arachis hypogaea* L.) submetido a déficit hídrico. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 04, n. 02, p. 1-7, 2004.

CARDOSO, J. M.; RIBEIRO, V. Q.; BASTOS, E. A. Densidades de plantas de feijão-caupi de porte semiprostrado sob irrigação. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2015. (Documentos, 110).

CARDOSO, M. J.; RIBEIRO, V. Q.; MELO, F. DE B. Performance da densidade de plantas em cultivares comerciais de feijão-caupi nos cerrados do leste maranhense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FEIJÃO-CAUPI, 3, 2013. Recife. **Resumos...** Recife, 2013.

CONAB. 2016. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Safra 2016/2017: Primeiro levantamento. 162p. Disponível em:. Acesso em 10 de Novembro de 2016.

CONCEIÇÃO, C. G. **Análise do crescimento e produtividade econômica do feijoeiro irrigado na região de Alegrete, RS**. 2016. F. 70. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2016.

DUTRA, A. F.; MELO, A. S.; FILGUEIRAS, L. M. B.; SILVA, A. R. F.; OLIVEIRA, I. M.; BRITO, M. E. B. Parâmetros fisiológicos e componentes de produção de feijão-caupi cultivado sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira Ciências Agrárias**, Recife, v. 10, n. 2, p.189-197, 2015.

EMBRAPA. BRS Itaim - Cultivar de feijão-caupi com grãos tipo fradinho. Teresina: **Embrapa Meio Norte, 2009**. (Embrapa Meio Norte. Folder).

FREITAS, R. M. O.; DOMBROSKI, J. L. D.; FREITAS, F. C. L.; NOGUEIRA, N. W.; PROCÓPIO, I. J. S. Produção de feijão-caupi sob efeito de veranico nos sistemas de plantio direto e convencional. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 6, suplemento 1, p. 3683-3690, 2013.

FIGUEREDO JÚNIOR, L. G. M.; NETO, D. D.; OLIVEIRA, R. F.; MANFRON, P. A.; MARTIN, T. N. Modelo para estimativa do índice de área foliar da cultura de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 4, n. 1, p. 8-13, 2005.

FERNANDES, F. B. P.; LACERDA, C. F.; ANDRADE, E. M.; NEVES, A. L. R.; SOUSA, C. H. C. Efeito de manejos do solo no déficit hídrico, trocas gasosas e rendimento do feijão-de-corda no semiárido. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 3, p. 506-515, jul-set, 2015.

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

FAVARIM, J. L.; NETO, D. D.; GARCÍA, A. G.; VILLA NOVA, N. A.; FAVARIN, M. G. G. V. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 6, p. 769, 2002.

FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q.; BARRETO, P. D.; SANTOS, A. A. Melhoramento genético. In: FREIRE FILHO, F. R.; LIMA, J. A. A.; RIBEIRO, V. Q. (Eds.). Feijão-caupi: avanços tecnológicos. Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica**, p. 28-92, 2005.

FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q.; ROCHA, M. M.; SILVA, K. J.; NOGUEIRA, M. S. R.; RODRIGUES, E. V. Feijão-caupi no Brasil: produção, melhoramento genético, **avanços e desafios**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 84 p. 2011.

FRANÇOIS, T. **Relações hídricas e trocas gasosas em plantas de feijão-caupi submetidas à irrigação deficitária**. 2012. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas**. 2. ed. Passo Fundo: UFP, 573 p, 2004.

FREITAS, R. M. O. **Crescimento e produção de feijão-caupi sob efeito de veranico nos sistemas de plantio direto e convencional**. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia), Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2012.

GCOS. 2004. Implementation plan for the Global Observing System for Climate in support of the UNFCCC. Report GCOS – 92 (WMO/TD No. 1219). 136p, 2004.

HOLANDA, J. S.; AMORIM, J. R. A.; FERREIRA NETO, M.; HOLANDA, A. C. **Qualidade da água para irrigação**. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade, p. 43-61, 2010.

HOFFMANN, C. M.; BLOMBERG, M. Estimation of leaf area index of beta vulgaris L. based on optical remote sensing data. **Journal of Agronomy e Crop Science**, v. 190, p. 197-204, 2004.

HENDERSON, T. L.; JOHNSON, B. L.; SCHNEITER, A. A. Row spacing, plant population, and cultivar effects on grain amaranth in the northern Great Plains. **Agronomy Journal**, v. 92, p. 329-336, 2000.

LI Q. Q.; CHEN Y. H.; LIU M. Y.; ZHOU X. B.; YU S. L.; DONG B. D. Effects of irrigation and straw mulching on microclimate characteristics and water use efficiency of winter wheat in North China. **Plant Production Science**, 11: 161–170, 2008.

LOCATELLI, V. E. R.; MEDEIROS, R. D.; SMIDERLE, O. J.; ALBUQUERQUE, J. A. A.; ARAÚJO, W. F.; SOUZA, K. T. S. Componentes de Produção, produtividade e eficiência da irrigação do feijão-caupi no cerrado de Roraima. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 6, p. 574–580, 2014.

LIU, F.; STÜTZEL, H. Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of vegetable amaranth (*Amaranthus spp.*) in response to drought stress. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam v. 102, n. 1, p. 15-27, 2004.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. São Carlos: Rima, 550 p, 2006.

MELO, F. B.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; PESSOA, B. L. O. Levantamento, zoneamento e mapeamento pedológico detalhado da área experimental da Embrapa Meio-Norte em Teresina, PI. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2014. 47 p. (Documentos / Embrapa Meio-Norte, ISSN 0104-866X; 231), 2014.

MARIANO, K. R. S.; BARRETO, L. S.; SILVA, A. H. B.; NEIVA, G. K. P.; RIBEIRO, A. J.; AMORIM, S. M. C. Fotossíntese e tolerância protoplasmática foliar em *Myracrodruon urundeuva* FR. ALL. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 39, n. 4, p. 853-859, out./dez. 2009.

MELO, F. B.; CARDOSO, J. C. Solos e Adubação. In: BASTOS, E. A. Cultivo de feijão-caupi. 2 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017, versão eletrônica. (Embrapa Meio-Norte. Sistema de Produção, 2; Embrapa Amazônia Ocidental. Sistema de Produção, 2; Embrapa Agrobiologia. Sistema de Produção, 4), 2017.

MIRANDA NETO, V. N.; CECCON, G.; SOUZA, E. F. C.; SANTOS, A. Resposta de quatro cultivares de feijão-caupi a diferentes densidades populacionais. In: CONGRESSO NACIONAL DE FEIJÃO-CAUPI (CONAC), 3., Recife, 2013. **Feijão-caupi como alternativa sustentável para os sistemas produtivos familiares e empresariais**. Recife-PE: IPA, 2013.

MENDES, R. M. S.; TÁVORA, F. J. A. F.; PINHO, J. L. N.; PITOMBEIRA, J. B. Relações fonte-dreno em feijão-de-corda submetido à deficiência hídrica. **Ciência Agrônômica**, v. 38, p. 95-103, 2007.

MATOSO, A. O. **Épocas de semeadura e populações de plantas para cultivares de feijão-caupi no outono-inverno em Botucatu-SP**. 2014. 134 f. Tese (Doutorado), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, campus de Botucatu, 2014.

NASCIMENTO, S. P.; BASTOS, E. A.; ARAÚJO, E. C. E.; FREIRE FILHO, F. R. F.; SILVA, E. M. Tolerância ao déficit hídrico em genótipos de feijão-caupi. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**. Campina Grande, vol. 15, n. 8, 2011.

NASCIMENTO, J. T.; PEDROSA, M. B.; TAVARES SOBRINHO, J. Efeito da variação de níveis de água disponível no solo sobre o crescimento e produção de feijão-caupi, vagens e grãos verdes. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 2, p. 174-177, abril-junho, 2004.

NÓBREGA, J. Q.; RAO, T. V. R.; BELTRÃO, N. E. M.; FIDELIS FILHO, J. Análise de crescimento do feijoeiro submetido a quatro níveis de umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 3, p. 437-443, 2001.

NASCIMENTO, S. P. **Efeito do déficit hídrico em feijão-caupi para identificação de genótipos com tolerância à seca**. 2009. 109 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal do Piauí. 2009.

NOGUEIRA, M. C. S. Experimentação Agronômica I: conceitos, planejamento e análise estatística. Piracicaba: M.C.S. Nogueira, 479 p, 2007.

OLIVEIRA, S. R. M. **Densidade populacional do feijão-caupi sob níveis de irrigação**. 2013. 103 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem), Universidade Federal do Ceará, 2013.

OLIVEIRA, G. A.; ARAÚJO, W. F.; CRUZ, P. L. S.; LIMA, W. L. M.; FERREIRA, G. B. Resposta do feijão-caupi as lâminas de irrigação e as doses de fósforo no cerrado de Roraima. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, p. 872-882, 2011.

OLIVEIRA, S. R. M.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. DE; RIBEIRO, V. Q.; BRITO, R. R.; CARVALHO, M. W. Interação de níveis de água e densidade de plantas no crescimento e produtividade do feijão-caupi, em Teresina, PI. **Irriga**, Botucatu, v. 20, n. 3, p. 502-513, julho-setembro, 2015.

OLIVEIRA, A. D.; FERNANDES, E. J.; RODRIGUES, T. J. D. Condutância estomática como indicador de estresse hídrico em Feijão. **Engenharia Agrícola**, v. 25, p. 86-95, 2005.

OLIVEIRA, R. M. M.; FREIRE FILHO, F. R.; OLIVEIRA, A. C.; RIBEIRO, V. Q.; VIEIRA, P. F. M. J. Seleção em feijão-caupi visando obtenção de linhagens extraprecoces. **Revista Nativa**, v. 5, n. 4, p. 250-256, 2017.

OLIVEIRA, R. L. L.; LIMA, L. G. S.; MOREIRA, A. R.; SOUZA, L. C.; COSTA, A. V. A.; SILVA, R. T. L. Modelos de determinação de área foliar em feijão-caupi. **Revista Nucleus**, v. 13, n. 1, 2016.

OLIVEIRA, F. A.; SILVA, J. J. S. Evapotranspiração, índice de área foliar e desenvolvimento radicular do feijão irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 25(3);3 17-322, mar. 1990.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 15. Ed. Piracicaba. ESALQ, 451p. (Biblioteca de ciências agrárias "Luiz de Queiroz", 15), 2009.

PHENE, C. J. Techniques for computerized Irrigation management. **Computer and Electronics in Agriculture**, New York, v. 3, n. 3, p. 189 -208, 1989.

PUPPALA, N.; FLOWLER, J. L.; JONES, T. L.; GUTSCHICK, V.; MURRAY, L. Evapotranspiration, yield, and water-use efficiency responses of *Lesquerella fendleri* at different growth stages. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 21, n. 1, p. 33-47, 2005.

PAIVA, A. S.; FERNANDES, E. J.; RODRIGUES, T. J. D.; TURCO, J. E. P. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n.1, p.161-169, jan./abr. 2005.

REIS, L. S.; AZEVEDO, C. A. V.; ALBUQUERQUE, A. W.; S. JUNIOR, J. F. Índice de área foliar e produtividade do tomate sob condições de ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 4, p. 386-391, 2013.

RAMOS, H. M. M.; BASTOS, E. A.; ANDRADE JUNIOR, A. S.; CARDOSO, M. J.; NASCIMENTO, F. N. Eficiência do uso da água e produtividade de grãos do feijão-caupi sob diferentes regimes hídricos. In: III CONGRESSO NACIONAL DE FEIJÃO-CAUPI – CONAC, 2013. Anais. Recife – Pernambuco, 2013.

SANTOS, P. L. S. **Respostas fisiológicas do feijão-caupi submetidos à restrição hídrica e aplicação de óxido de cálcio sobre as folhas**. 2016. 44 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Biodiversidade), Universidade Federal de Sergipe, 2016.

SILVA, A. R. F. **Componentes de produção e fisiológicos em ecótipos de vigna sob reposição hídrica**. 2014. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias). 2014.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT® 14.1 User's Guide**. Cary, 2015. Disponível em: <<http://support.sas.com/documentation/cdl/en/statug/68162/PDF/default/statug.pdf>>. Acesso em: 26 jan. 2016.

STONE, L.F. Irrigação do feijoeiro e do arroz de terras altas no sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, v. 14. p. 31- 34, 2005.

SANTOS, C. A. F.; ARAUJO, F. P. DE. Produtividade e morfologia de genótipos de caupi em diferentes densidades populacionais nos sistemas irrigado e de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 10, p.1977-1984, out. 2000.

SILVA, C. R.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; MELO, F. B.; SOUSA, A. B.; SOUZA, C. F. **Calibração da sonda de capacitância Diviner 2000® em um Argissolo**. XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2006, João Pessoa, PB, Resumos Expandidos.

SHIMADA, M. M.; ARF, O.; SÁ, M. E. Componentes do rendimento e desenvolvimento do feijoeiro comum de porte ereto sob diferentes densidades populacionais. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p. 181-187, 2000.

SILVA, E. F.; BARROS JÚNIOR, A. P.; SILVEIRA, L. M.; SANTANA, F. M. S.; SANTOS, M. G. Avaliação de cultivares de feijão-caupi irrigado para produção de grãos verdes em Serra Talhada, PE. **Revista Caatinga**, v. 26, n. 1, p. 21-26, 2013.

SOUSA, V. F.; COELHO, E. F.; JUNIOR, A. S. de A.; FOLEGATTI, M. V.; FRIZZONE, J. A. Eficiência do uso da água pelo meloeiro sob diferentes frequências de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 183-188, 2000.

SOUZA, P. J. O. P.; FARIAS, V. D. S.; LIMA, M. J. A.; RAMOS, T. F.; SOUSA, A. M. L. Cowpea leaf area, biomass production and productivity under different water regimes in Castanhal, Pará, Brazil. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 3, p. 748 – 759, jul.– set, 2017.

SOUZA, L. S. B.; MOURA, M. S. B.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, T. G. F. Eficiência do uso da água das culturas do milho e do feijão-caupi sob sistemas de plantio exclusivo e consorciado no semiárido brasileiro. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 3, p.715-721, 2011.

SILVA, G. C.; MAGALHÃES, R. C.; SOBREIRA, A. C.; SCHMITZ, R.; SILVA, L. C. Rendimento de grãos secos e componentes de produção de genótipos de feijão-caupi em cultivo irrigado e de sequeiro. **Revista Agroambiente**, v. 10, n. 4, p. 342-350, outubro-dezembro, 2016.

SILVA, T. O.; NETO, A. E. F.; CARNEIRO, L. F.; PALUDO, V. Plantas de cobertura submetidas a diferentes fontes de fósforo em solos distintos. **Ciências Agrárias**, v. 32, p. 1315-1326, 2011.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M.; MOREIRA, J. A. A.; BRAZ, A. J. B. P. Evapotranspiração do feijoeiro irrigado em plantio direto sobre diferentes palhadas de culturas de cobertura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 4, p. 577-582, 2006.

SUMMERFIELD, R. J.; PATE, J. S.; ROBERTS, E. H.; WIEN, H. C. The physiology of cowpeas. In: SINGH, S. R.; RACHIE, K. O., (ed) **Cowpea Research Production and Utilization**. Chichester, John Wiley, p. 65-101, 1984.

SILVA, C. D. S.; SANTS, P. A. A.; LIRA, J. M. S.; SANTANA, M. C.; JUNIOR, C. D. S. Curso diário das trocas gasosas em plantas de feijão-caupi submetidas à deficiência hídrica. **Revista Caatinga**, v. 23, p. 7-13, 2010.

SIMIDU, H. M.; SÁ, M. E.; SOUZA, L. C. D.; ABRANTES, F. L.; ARF, M. P. S. Efeito do adubo verde e época de semeadura sobre a produtividade do feijão, em plantio direto em região de cerrado. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 32, n. 2, p. 309-315, 2010.

SOUZA, T. M. A.; SOUZA, T. A.; SOLTO, L. S.; SÁ, F. V. S.; PAIVA, E. P.; BRITO, M. E. B.; MESQUITA, E. F. Crescimento e trocas gasosas do feijão caupi cv. BRS Pujante sob níveis de água disponível no solo e cobertura morta. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 4, p. 796-805, outubro-dezembro, 2016.

SHEN, J. Y.; ZHAO, D. D.; HAN, H. F.; ZHOU, X. B.; LI, Q. Q. Effects of straw mulching on water consumption characteristics and yield of different types of summer maize plants. **Plant Soil Environ**, 58, p. 161-166, 2012.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 5. ed. São Paulo: ARTMED, 918 p, 2013.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819 p5

TRIPATHI, S. S.; SINGH, P. P. The association of planting density and plant type in French bean (*Phaseolus vulgaris*). **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 22, n. 4, p. 427- 429, 1986.

TAGLIAFERRE, C.; SANTOS, T. J.; , SANTOS, L. DA C.; SANTOS NETO, I. J.; ROCHA, F. A.; PAULA, A. Características agronômicas do feijão-caupi inoculado em função de lâminas de irrigação e de níveis de nitrogênio. **Revista Ceres**, v. 60, n. 2, p. 242 - 248, 2013.

ZIMMERMANN, F. J. P. Estatística aplicada à pesquisa agrícola. 2. ed. rev. ampl. Brasília. DF: Embrapa; Santo Antônio de Goiás: **Embrapa Arroz e Feijão**, 582 p, 2014.