

ECOFISIOLOGIA E PRODUTIVIDADE DE CULTIVARES DE
FEIJÃO-CAUPI (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) SOB DIFERENTES
TURNOS DE REGA

NAYLA LEITE MOTTA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
AGOSTO – 2022

ECOFISIOLOGIA E PRODUTIVIDADE DE CULTIVARES DE
FEIJÃO-CAUPI (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) SOB DIFERENTES
TURNOS DE REGA

NAYLA LEITE MOTTA

Dissertação apresentada ao Centro de
Ciências e Tecnologias Agropecuárias da
Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro, como parte das exigências
para obtenção do título de mestre em
produção vegetal

Orientador: Prof. Fábio Cunha Coelho

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
AGOSTO – 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

M921

Motta, Nayla Leite.

ECOFISIOLOGIA E PRODUTIVIDADE DE CULTIVARES DE FEIJÃO-CAUPI (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) SOB DIFERENTES TURNOS DE REGA / Nayla Leite Motta. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2022.

109 f. : il.

Bibliografia: 67 - 84.

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2022.

Orientador: Fabio Cunha Coelho.

1. Estresse hídrico. 2. Irrigação. 3. Feijão fradinho. 4. Pegada hídrica. 5. Produtividade. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 630

ECOFISIOLOGIA E PRODUTIVIDADE DE CULTIVARES DE
FEIJÃO-CAUPI (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) SOB DIFERENTES
TURNOS DE REGA

NAYLA LEITE MOTTA

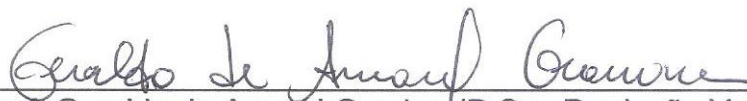
“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de mestre em produção vegetal.”

Aprovada em 01 de Agosto de 2022

Comissão Examinadora:



Prof. Elias Fernandes de Souza (D.Sc., Produção Vegetal) – UENF



Prof. Geraldo de Amaral Gravina (D.Sc., Produção Vegetal) – UENF



Prof. Willian Pereira (D.Sc., Agronomia – Ciência do Solo) – UFRRJ



Prof. Fábio Cunha Coelho (D.Sc., Fitotecnia – Produção Vegetal) – UENF
(Orientador)

Dedico

A Deus, meu criador, meu alicerce e guia;

Aos meus pais, Róbson Silveira Motta e Norma Aparecida Leite Motta, que sempre se esforçaram para me ajudar e ensinar;

À minha irmã, Ana Luiza Leite Motta, companheira e amiga querida;

À minha avó Rachel Silveira Motta, que sempre se alegrou com minhas conquistas;

Aos meus avós, José Leite (*in memoriam*) e Esmeralda Peixoto Leite (*in memoriam*), que também gostava de cultivar plantas;

Ao meu bisavô José Baptista da Silveira Filho (*in memoriam*), que era agricultor e um admirável enxertista de mudas;

A todos aqueles a quem esta pesquisa possa ajudar de alguma forma.

AGRADECIMENTOS

A Deus e a Jesus por serem forças constantes em minha vida, me iluminando em cada etapa percorrida e ajudando a superar meus limites nos momentos difíceis;

Aos meus pais, Róbson e Norma, e à minha irmã Ana Luiza. Obrigada por me ajudarem, tanto física como emocionalmente, durante todas as etapas deste trabalho;

Ao meu orientador, professor Fábio Cunha Coelho por ter aceitado me acompanhar neste projeto. Obrigada pela orientação, paciência, ensinamentos, palavras de motivação e incentivo desde a graduação;

Às minhas amigas de UENF, Bárbara Almeida e Monique Fernandes, pelo carinho e amizade de longa data. Obrigada pela compreensão e por sempre se fazerem presentes;

Aos amigos que conheci durante a pandemia, Jéssica Vitória, Ricardo Rodrigues e Ana Carolina Santos, os quais me apoiaram, torceram e me tiraram boas risadas; À amiga, Mylca Alves, pelas orações, conversas e conselhos, mesmo estando tão distante. Obrigada pela compreensão nos momentos de ausência;

Aos professores, Janie Jasmim, Silvio Freitas, José Carlos Mendonça, Elias Fernandes, Cláudia Marinho e Débora Barroso pelos ensinamentos, apoio e incentivos; Aos professores Eliemar Campostrini, Henrique Vieira e Marta Simone pela ajuda durante este trabalho;

Aos colegas do Laboratório de Fitotecnia, Detony, Giovana Carvalho, Danielle Marques, Juliana Ventura, Assistony Costa, Liliane Machado e Alex do Carmo por todo apoio e ajudas durante a condução do experimento, além das palavras de motivação e perseverança; Ao colega do Laboratório de Fisiologia Vegetal, Guilherme Augusto, por me ajudar nas avaliações; Ao meu coorientador, Derivaldo Pureza, pela atenção e ajuda no desenvolvimento deste trabalho;

Aos demais colegas e funcionários da UENF que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho;

Aos meus familiares que oraram, torceram e desejaram meu bem;

A banca avaliadora por atenderem ao meu convite e pelas considerações que enriqueceram meu trabalho e futuro profissional;

A Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) e ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, pela oportunidade deste curso; a Capes por conceder a bolsa de estudos;

A empresa *Total Biotecnologia Indústria e Comércio S/A*, por fornecer o inoculante comercial líquido *Total/Nitro* para feijão-caupi utilizado no experimento;

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

"Assim como escolhemos ir à lua
Nós sabemos que nunca é cedo demais
Para escolher a esperança.
Nós escolhemos fazer mais do que lidar
Com as mudanças climáticas
Nós escolhemos acabar com isso—
Nós nos recusamos a perder.
Juntos fazemos isso e muito mais
Não porque é muito fácil ou legal
Mas porque é necessário,
Porque a cada amanhecer
Nós carregamos o peso do destino deste corpo
celeste que orbita uma estrela.
E tão pesado quanto aquele peso parecia, não
nos segura,
Mas nos mantém aterrados, firmes, prontos,
Porque um movimento ambiental desse porte
É simplesmente outra forma de nascer da
Terra."

(*Amanda Gorman*)
Trecho traduzido do poema "*Earthrise*"

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo Geral	3
2.2. Objetivos Específicos.....	3
3. REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1. Histórico e Morfologia do Feijão-caupi (<i>Vigna unguiculata</i> L. Walp).....	4
3.2. Importância Socioeconômica do Feijão-caupi	7
3.3. Aspectos botânicos e produtivos das cultivares ‘BRS Pajeú’, ‘BRS Marataoã’, ‘BRS Rouxinol’	9
3.3.1. A cultivar ‘BRS Pajeú’	9
3.3.2. A cultivar ‘BRS Marataoã’	10
3.3.3. A cultivar ‘BRS Rouxinol’	11
3.4. Demanda Hídrica do Feijão-caupi, Aquecimento Global e a “Pegada Hídrica” (Water Footprint)	12
3.4.1. Divisões da Pegada Hídrica	15
3.4.1.1. Pegada Hídrica Azul.....	15
3.4.1.2. Pegada Hídrica Verde	16
3.4.1.3. Pegada Hídrica Cinza.....	17

3.4.2. Cálculo da Pegada Hídrica Azul, Verde e Cinza de cultivos de safra ou de silvicultura.....	19
3.4.3. Pegada Hídrica Média Total (WF_{Proc}) das principais culturas de interesse econômico.....	20
3.5. Efeitos do déficit hídrico sobre as características morfológicas e fisiológicas.....	21
3.6. O Nitrogênio e sua Fixação Biológica no Feijão-Caupi.....	23
3.7. Inoculação de feijão-caupi com microrganismos fixadores de nitrogênio visando maior produtividade de grãos.....	25
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
4.1. Experimento.....	27
4.2. Avaliações Morfofisiológicas e componentes de Produtividade.....	35
4.2.1. Avaliações Morfológicas.....	35
4.2.2. Avaliações Fisiológicas.....	36
4.2.2. Teor de N amoniacal na parte aérea e na semente.....	37
4.2.2.1. Teor de N amoniacal na parte aérea.....	37
4.2.2.2. Teor de N amoniacal na semente.....	38
4.2.3. Avaliações de componentes de produtividade e Pegada Hídrica Azul.....	38
4.2.4. Cálculo da Pegada Hídrica.....	38
4.4. Análise Estatística.....	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
5.1. Avaliações Morfológicas.....	40
5.2. Avaliações Fisiológicas.....	47
5.3. Componentes de produtividade e Pegada Hídrica Azul.....	54
6. RESUMO E CONCLUSÕES.....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
APÊNDICE.....	85

RESUMO

MOTTA, Nayla Leite; MSc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Agosto de 2022. Ecofisiologia e Produtividade de cultivares de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) sob diferentes turnos de rega. Orientador: Prof. Fábio Cunha Coelho. Coorientador: Derivaldo Pureza da Cruz.

O feijão-caupi, pelo alto valor nutritivo e rusticidade, é uma das leguminosas mais cultivadas no mundo. No Brasil, a cultura vem despertando interesse nos grandes produtores por sua adaptabilidade aos fatores edafoclimáticos e aos baixos custos de produção. Entretanto, apesar da grande produção mundial, o feijão-caupi apresenta em média baixa produtividade no Brasil, devido à baixa fertilidade dos solos e uso de cultivares não melhoradas. Além disso, a irregularidade de precipitações pluviométricas e a redução na disponibilidade de água doce para irrigação também têm afetado a produtividade da cultura no país. Visando diminuir os impactos causados por essas deficiências, estudos científicos e práticas de gestão da água relacionados ao consumo da água ao longo das cadeias produtivas, têm ganhado espaço no cenário acadêmico. Assim, este trabalho teve por objetivo avaliar os impactos causados por estresse hídrico sobre a fisiologia e a produtividade de cultivares de feijão-caupi submetidas a diferentes turnos de rega. O experimento foi implantado em casa de vegetação utilizando-se o arranjo fatorial (3 x 4), sendo três cultivares de caupi ('BRS Pajeú', 'BRS Marataoã' e 'BRS Rouxinol') e quatro turnos de rega com irrigação a cada 2, 4, 6 e 8 dias. O delineamento foi feito em blocos casualizados com quatro repetições. Todas as cultivares foram inoculadas com *Bradyrhizobium* sp. (BR3267 + INPA3-11B). O

experimento foi realizado em duplicata, sendo caracterizado por duas fases: Fase 1 (0 a 52 dias após a semeadura, com avaliações morfofisiológicas) e Fase 2 (52 a 120 dias após a semeadura, com avaliações de produtividade). Foram avaliadas características morfológicas [comprimento da nervura central da folha diagnóstica (D), número de folhas, área foliar, área foliar da folha D, comprimento da haste principal, diâmetro da haste principal, comprimento do sistema radicular, massa fresca da parte aérea e massa seca da parte aérea], teor de clorofila (SPAD), eficiência fotoquímica pela fluorescência (Fv/Fm), índice de desempenho fotoquímico (Plabs), potencial hídrico foliar (Ψ_f), condutância estomática, teores de nitrogênio da parte aérea e na semente, pegada hídrica azul do feijão-caupi e componentes de produtividade (número de vagens por planta, número de grãos por vagem, número de grãos por planta, massa total de grãos por planta, massa de 100 grãos e produtividade em kg ha^{-1}). Todas as variáveis morfológicas, exceto comprimento de raiz, foram influenciadas pelos turnos de rega. 'BRS Marataoã' apresentou maior plasticidade e tolerância ao estresse hídrico que 'BRS Pajeú' e 'BRS Rouxinol' pelas médias de Fv/Fm e de Plabs. A redução nos valores de Plabs com os intervalos de turno de rega, não afetou a produtividade das cultivares. 'BRS Pajeú' e 'BRS Marataoã' destacaram-se pelas maiores médias em produtividade de grãos (kg ha^{-1}), e boa adaptação em condições de déficit hídrico severo. 'BRS Rouxinol' apresentou maior sensibilidade às condições de escassez hídrica impostas. 'BRS Pajeú' apresentou menores médias de Pegada Hídrica Azul. Pela rusticidade, adaptabilidade e maior média geral em produtividade de grãos (aproximadamente, 1242 kg ha^{-1}), nas condições estabelecidas no experimento, a cv. BRS Pajeú é a mais indicada para o cultivo em condições de restrição de fornecimento de água na irrigação com turnos de rega mais espaçados.

Palavras-chave: estresse hídrico; irrigação; feijão fradinho.

ABSTRACT

MOTTA, Nayla Leite; MSc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. August, 2022. Ecophysiology and productivity of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) cultivars under different irrigation shifts. Advisor: Prof. Fábio Cunha Coelho. Co-advisor: Derivaldo Pureza da Cruz.

Cowpea, due to its high nutritional value and rusticity, is one of the most cultivated legumes in the world. In Brazil, the culture has aroused interest in large producers for its adaptability to edaphoclimatic factors and low production costs. However, despite the large world production, cowpea has on average low productivity in Brazil, due to low soil fertility and use of unimproved cultivars. In addition, irregular rainfall and reduced availability of fresh water for irrigation have also affected crop productivity in the country. In order to reduce the impacts caused by these deficiencies, scientific studies and water management practices related to water consumption along the production chains have gained space in the academic scenario. Thus, this work aimed to evaluate the impacts caused by water stress on the physiology and productivity of cowpea cultivars submitted to different irrigation shifts. The experiment was implemented in a greenhouse using a factorial arrangement (3 x 4), with three cowpea cultivars ('BRS Pajeú', 'BRS Marataoã' and 'BRS Rouxinol') and four irrigation shifts with irrigation every 2, 4, 6 and 8 days. The design was done in randomized blocks with four replications. All cultivars were inoculated with *Bradyrhizobium* sp. (BR3267 + INPA3-11B). The experiment was carried out in duplicate, being characterized by two phases: Phase 1 (0 to 52 days after sowing, with morphophysiological evaluations) and

Phase 2 (52 to 120 days after sowing, with productivity evaluations). Morphological characteristics [length of the diagnostic leaf midrib (D), number of leaves, leaf area, leaf area of leaf D, main stem length, main stem diameter, root system length, shoot fresh mass and shoot dry mass], chlorophyll content (SPAD), fluorescence photochemical efficiency (Fv/Fm), photochemical performance index (Plabs), leaf water potential (Ψ_f), stomatal conductance, nitrogen contents in shoots and in seed, cowpea blue water footprint and yield components (number of pods per plant, number of grains per pod, number of grains per plant, total weight of grains per plant, weight of 100 grains and yield in kg ha^{-1}). All morphological variables, except root length, were influenced by irrigation shifts. 'BRS Marataoã' showed greater plasticity and tolerance to water stress than 'BRS Pajeú' and 'BRS Rouxinol' by means of Fv/Fm and Plabs. The reduction in the values of Plabs with the intervals of irrigation shift did not affect the productivity of the cultivars. 'BRS Pajeú' and 'BRS Marataoã' stood out for the highest averages in grain yield (kg ha^{-1}), and good adaptation in conditions of severe water deficit. 'BRS Rouxinol' showed greater sensitivity to imposed water scarcity conditions. 'BRS Pajeú' presented lower Blue Water Footprint averages. Due to rusticity, adaptability and higher general average in grain yield (approximately 1242 kg ha^{-1}), under the conditions established in the experiment, cv. BRS Pajeú is the most suitable for cultivation in conditions of restricted water supply in irrigation with more spaced irrigation shifts.

Keywords: water stress; irrigation; black-eyed peas.

1. INTRODUÇÃO

A maior parte da água utilizada pela humanidade é direcionada à produção agrícola. Porém, tem-se observado alterações extremas nos eventos climáticos mundiais, tais como inundações, secas e ciclones. Esses fenômenos têm alterado ecossistemas e o abastecimento de água, causando impactos em meios de subsistência, perturbando o bem-estar humano, como também, gerando grande preocupação relacionada à segurança alimentar (IPCC, 2014).

De acordo com o IPCC (2014), o efeito estufa promove elevação de 0,14°C na temperatura mundial a cada 10 anos e a estimativa é de que ocorra elevação total na faixa de 3,7 a 4,8°C até 2100. Se houver aumento de 2°C na temperatura média de regiões tropicais e temperadas até o final do século XXI, cultivos de grãos e cereais terão suas produções afetadas negativamente.

Com as mudanças climáticas, os cenários de escassez hídrica se estenderão para outras regiões do país, como já se observa no estado do Rio de Janeiro (Azevedo, 2002).

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) tem se mostrado ser uma cultura de grande importância para a agricultura brasileira, pelo alto valor nutricional de seus grãos e pelo baixo custo de produção, além da rusticidade, moderada tolerância ao déficit hídrico, boa adaptação aos solos de baixa fertilidade e baixo pH, além de ser capaz de fixar nitrogênio atmosférico pela interação com bactérias fixadoras de nitrogênio (Araújo, 2019).

Por estas características, a cultura apresenta altas perspectivas para o Estado do Rio de Janeiro, sendo uma ótima alternativa de cultivo, em relação a

outras culturas em decadência no Estado, e de empregabilidade no setor agropecuário, porém ainda são escassos investimentos e informações para a cultura em grande parte do Estado (Araújo, 2019).

Fatores como cultivar, características do solo e tempo de exposição à escassez hídrica podem influenciar as respostas das plantas ao estresse hídrico (Nascimento et al, 2011), reduzindo ou aumentando a tolerância destas às condições de deficiência hídrica. Além destes fatores, observa-se que esta tolerância é evidenciada por mais de uma variável fisiológica, indicando a necessidade de se avaliar outras características como condutância estomática, transpiração, temperatura foliar e potencial hídrico (Nogueira et al., 2001).

A escassez hídrica é um dos agentes abióticos mais agravantes, afetando diversos processos fisiológicos das plantas e influenciando o sucesso da lavoura (Endres et al., 2010).

Diante do cenário caótico que se espera no futuro, devido à reduzida disponibilidade hídrica, faz-se necessário investir em tecnologias e pesquisas que conservem e aumentem a produtividade das culturas, além de estudos que busquem avaliar o desempenho de cultivares sob determinadas condições como as de estresse hídrico, visando o melhor planejamento do uso da água, frente às características climáticas futuras.

Tem-se como hipótese de trabalho que cultivares de feijão-caupi apresentarão características morfofisiológicas e desempenhos diferenciados em condições de fornecimento adequado de água e de estresse hídrico.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o impacto do estresse hídrico sobre a fisiologia e a produtividade de cultivares de feijão-caupi submetidas a tratamentos de déficit hídrico.

2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a produtividade de 3 cultivares de feijão-caupi submetidas a condições de déficit hídrico;
- Avaliar características morfológicas e fisiológicas de cultivares de feijão-caupi submetidas a estresse hídrico;
- Avaliar o efeito do déficit hídrico sobre a floração e o enchimento de grãos do feijão-caupi;
- Analisar o efeito da restrição hídrica, aplicada na fase vegetativa, sobre as características fisiológicas e produtivas do feijão-caupi, visando à identificação das cultivares com maior tolerância à deficiência hídrica;
- Avaliar a interação entre cultivares de feijão-caupi e restrição hídrica;
- Testar as cultivares em condições de estresse hídrico e de restrição nutricional, na fase inicial de desenvolvimento da cultura.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Histórico e Morfologia do Feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp)

O feijão-caupi é uma dicotiledônea da família Fabaceae, gênero *Vigna* e espécie *Vigna unguiculata* (L.) Walp (Padulosi e Ng, 1997). O gênero *Vigna* possui cerca de 20.000 espécies de leguminosas (Doyle, 1994), destacando-se o feijão-caupi (*V. unguiculata*), feijão mungo (*V. radiata*) e feijão azuki (*V. angularis*), os quais têm grande importância para a agricultura mundial (Lambrides e Godwin, 2007; Vásquez, 2014).

Originário do continente africano, o feijão-caupi foi introduzido no Brasil, no Estado da Bahia, por portugueses no século XVI, e, posteriormente, disseminado por todo o país (Freire Filho, 2011). Atualmente, é cultivado com maior predominância nas regiões Norte e Nordeste, nas quais tem grande importância econômica e social, por seu valor nutricional e rusticidade, mas apresenta boa produtividade em outras regiões do país, por sua alta adaptabilidade às condições climáticas tropicais e subtropicais (Sarr et al., 2011; Almeida et al., 2017).

No Brasil, o feijão-caupi ganhou vários nomes populares com o passar dos anos, de acordo com cada região do país. Pode ser chamado de feijão-de-praia, feijão-da-colônia e feijão-de-estrada no Nordeste; Feijão-miúdo ou manteiguinha, no Norte (Freire Filho et al., 2005a). No Rio de Janeiro, Sergipe e Bahia, um tipo específico de grão com tegumento branco e um grande halo preto

é chamado de feijão-fradinho, o qual é muito utilizado no preparo do acarajé (Freire Filho et al., 2011a).

As plantas do feijão-caupi são herbáceas, anuais, autógamas, adaptam-se bem em condições climáticas tropicais e em solos com pouca umidade e baixa fertilidade, tornando a espécie uma ótima fonte proteica, com rápido ciclo reprodutivo a baixos custos (Araújo, 2019). A cultura também apresenta tolerância ou resistência às principais doenças e pragas de interesse agrônômico. Além desses fatores, deve-se considerar outras características ao se escolher uma cultivar de feijão-caupi, como hábitos de crescimento, porte da planta, ciclo de maturação e tipos comerciais de grão, para melhor atender as necessidades dos produtores e do mercado (EMBRAPA, 2017).

Segundo Freire Filho et al. (2005a), há 6 tipos de classificação para o ciclo de maturação das plantas de feijão-caupi, compreendendo o período entre a emergência e a maturação fisiológica, e 4 tipos de classificações quanto ao porte das plantas, de acordo com o comprimento dos ramos principal e secundários, e o ângulo formado entre eles (Tabela 1).

A interação de características como disposição dos ramos laterais em relação ao ramo principal, comprimentos dos ramos principal e secundários, do hipocótilo, do epicótilo, dos entrenós, e do pedúnculo das vagens; hábito de crescimento e consistência dos ramos, formam a arquitetura das plantas de feijão-caupi. O grau de acamamento das plantas é influenciado pela consistência dos ramos (EMBRAPA, 2017).

A arquitetura não é um fator importante para cultivos tradicionais de pequenas áreas ou consorciados, porém deve-se ter como prioridade as cultivares semiprostradas, que apresentem ramos de tamanho médio a longo. As cultivares de portes mais ereto e compacto com ramos curtos são de preferência para cultivos irrigados ou tecnificados de sequeiro, pois portes eretos permitem maior densidade populacional e a mecanização da colheita, o que contribui para o incremento da produção (EMBRAPA, 2017).

Tabela 1. Classificações quanto ao ciclo de maturação e porte das plantas de feijoeiro caupi, compreendendo períodos entre emergência e maturação fisiológica da cultura, de acordo com Freira Filho et al. (2005b)

CICLO DE MATURAÇÃO	
Ciclo superprecoce	Maturação em até 60 dias
Ciclo precoce	Maturação entre 61 e 70 dias
Ciclo médio-precoce	Maturação entre 71 e 80 dias
Ciclo médio	Maturação entre 71 e 90 dias
Ciclo médio-tardio	Maturação entre 81 e 90 dias
Ciclo tardio	Maturação acima de 90 dias
PORTE DA PLANTA	
Porte ereto	Ramos principal e secundários de comprimento curto; os ramos secundários formam ângulo de agudo a reto em relação ao ramo principal
Porte semiereto	Ramos principal e secundários de comprimento curto a médio; os ramos secundários formam ângulo reto em relação ao ramo principal
Porte semiprostrado	Ramos principal e secundários de comprimento médio; os ramos secundários tocam o solo
Porte prostrado	Ramos principal e secundários de comprimento longo; os ramos secundários tocam o solo

3.2. Importância Socioeconômica do Feijão-caupi

Existem, aproximadamente, 12,4 milhões de hectares em todo o mundo com cultivos de espécies do gênero *Vigna*, sendo os países asiáticos responsáveis pela maior parte da produção mundial (FAO, 2018).

Os países que têm a maior produção mundial de feijão-caupi são: Nigéria (2,5 milhões de toneladas), Níger (1 milhão de toneladas), Brasil (848,3 mil toneladas), Burkina Faso (398 mil toneladas), Tanzânia (131 mil toneladas) (FAO, 2018).

No Brasil, a produção de feijão-caupi concentra-se nas regiões Norte e Nordeste como cultura de subsistência, entretanto, seu cultivo disseminou-se para as regiões Centro-oeste, Sul e Sudeste, devido à tecnificação dos cultivos (Araújo, 2019), sendo amplamente cultivado na entressafra das demais culturas tradicionais dessas regiões (Rodrigues et al., 2017).

Em virtude de pesquisas direcionadas ao desenvolvimento de cultivares para manejo mecanizado, a região Centro-Oeste vem investindo no plantio de feijão-caupi. Graças a estas tecnologias, os cultivos vêm se expandindo para áreas extensas, tornando o Brasil um dos maiores consumidores e produtores mundiais do feijão-caupi (Araújo, 2019).

A produtividade média de feijão-caupi, entre 2005 e 2009, foi de 369,14 kg.ha⁻¹ (Freire Filho et al., 2011) e a produção mundial foi estimada em 1,9 milhões de toneladas nas safras de 2012 (FAOESTAT, 2015). Nas safras de 2017/2018, houve um aumento de produtividade, em relação às safras anteriores, de 506 kg.ha⁻¹ para 520 kg.ha⁻¹ em consequência da expansão de área cultivada. Esse crescimento permaneceu em alta registrando cerca de 10% a mais que os anos anteriores, partindo das 713 mil toneladas para 787 mil toneladas (CONAB, 2018).

Atualmente, a área total plantada com grãos no país é de 74,3 milhões de hectares, apresentando crescimento de 6% em relação à safra de 2020/21 e estimativa de produção total de grãos de 271,2 milhões de toneladas (5,6% maior que a safra anterior). Deste total, estima-se que 3 milhões de toneladas seja composto pela produção total de feijão (feijão-comum + feijão-caupi), sendo 629,3 mil toneladas de feijão-caupi, apresentando redução de 20% em relação à safra de 2017/18 (CONAB, 2022).

Como o terceiro maior produtor mundial de feijão-caupi e um dos países que mais consomem o grão, o Brasil entrou, em 2007, para a lista dos maiores exportadores, comercializando a princípio para Portugal, Canadá, Israel, Turquia, Egito e Índia. Atualmente, a Índia consome 100.000 toneladas por ano, sendo o país que mais importa feijão-caupi brasileiro, consumindo 20% da produção brasileira (EMBRAPA, 2016).

O Brasil produz grãos secos, grãos verdes, vagens verdes e sementes frescas para o consumo interno, e grãos secos para o mercado externo. Para o consumo interno, o que predomina é o mercado de grãos secos, entretanto, observa-se um grande potencial para o mercado de farinha, congelamento e grãos em conserva (Silva et al, 2013).

Quanto ao mercado externo, o que predomina é o comércio de grãos secos, com um aumento crescente das exportações, o que tem levado à expansão de área plantada e investimentos dos grandes produtores (EMBRAPA, 2016).

Grande parte da produção de feijão-caupi ainda se mantém com a agricultura familiar, porém tem-se observado interesse por parte dos grandes produtores, os quais investem em novas tecnologias e, conseqüentemente vêm expandindo a produção por todo o país, em especial para a região Centro-Oeste (Matoso et al., 2013). Além disto, a cultura apresenta altas perspectivas para o Estado do Rio de Janeiro pela alta capacidade de se adaptar aos solos de baixa fertilidade, baixa disponibilidade hídrica, demandando pouco investimento inicial na produção, sendo uma ótima alternativa de cultivo em relação a outras culturas no Estado, e de empregabilidade no setor agropecuário, porém ainda são escassos investimentos e informações para a cultura em grande parte do Estado (Araújo, 2019).

Apesar da grande produção mundial, observa-se que o feijão-caupi tem uma média baixa de produtividade no Brasil, principalmente, na região Nordeste. Atribui-se este fato, dentre outros, aos solos de baixa fertilidade naquela região, e à irregularidade das precipitações pluviométricas; outro fator é a concentração da produção nas mãos dos pequenos e médios produtores, os quais não possuem acesso a melhores tecnologias (Silva et al., 2019).

Em decorrência disto, é importante investir em estudos e pesquisas com o objetivo de se desenvolver técnicas que viabilizem os cultivos de feijão-caupi, principalmente, em áreas de baixa capacidade produtiva.

3.3. Aspectos botânicos e produtivos das cultivares ‘BRS Pajeú’, ‘BRS Marataoã’, ‘BRS Rouxinol’

3.3.1. A cultivar ‘BRS Pajeú’

A cultivar ‘BRS Pajeú’ é originária do cruzamento entre a linhagem CNCx 405-17F (parental feminino), procedente da Embrapa Arroz e Feijão com a linhagem TE94-268-3D (parental masculino) da Embrapa Meio-Norte. Seleções em campo e em laboratório foram estabelecidas visando obter as melhores cultivares quanto à produtividade e resistência a vírus, e qualidade de grãos (cor, forma e tamanho), respectivamente. Também foram realizados um ensaio Preliminar de Porte SemiProstrado em 2001, e Ensaio de Valor de Cultivo Uso (VCU) de Porte SemiProstrado, conduzidos nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste entre 2002 e 2006, nos quais a cultivar que mais se destacou foi a TE97-304G-12, nomeada comercialmente como BRS Pajeú e lançada no ano de 2009 (Freire Filho et al., 2009).

A cultivar ‘BRS Pajeú’ apresenta ciclo de maturação médio-precoce de 70 a 75 dias, hábito de crescimento indeterminado, porte semiprostrado (Locatelli et al., 2016), inflorescência do tipo simples com cálice de cor verde e pétalas de cor roxa, e média de 39 dias para a floração após a semeadura. As vagens imaturas apresentam cor verde e vagens secas apresentam cor amarela com comprimento médio de 21,4 cm e número médio de 16 grãos por vagem. As vagens se inserem levemente acima da folhagem, facilitando a colheita manual. Os grãos apresentam cor marrom clara e formato romboide, com tegumento liso e halo marrom claro, pertencendo à classe comercial Cores e subclasse Mulato. O peso médio de 100 sementes é de 21g. Os grãos apresentam rápido cozimento e são ricos em zinco e ferro (Freire Filho et al., 2009).

Esta cultivar apresenta resistência ao Mosaico dourado (*Cowpea golden mosaic vírus*), resistência moderada ao Mosaico severo do feijão-caupi (*Cowpea severe mosaic virus*), Mosaico transmitido por pulgão (*Cowpea aphid borne*

mosaic virus), Mancha café (*Colletotrichum truncatum* (Schw.) Andrus & Moore) e Oídio (*Erysiphe polygoni* DC.), e susceptibilidade à Mela (*Thanatephorus cucumeris* (Frank) Donk.) (Freire Filho et al., 2009).

Testes de produtividade de grãos, realizados em regime de sequeiro nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, entre os anos de 2004 e 2006, mostraram que a cultivar teve as maiores produtividades nos estados de Roraima com 1.108 kg.ha⁻¹, Piauí com 1.651 kg.ha⁻¹, e Mato Grosso do Sul com 959 kg.ha⁻¹, além de uma média geral entre as três regiões de 1.035 kg.ha⁻¹. Entre os anos de 2003 e 2005, em Teresina, foram realizados testes de produtividade de grãos em regime irrigado, obtendo-se uma média produtiva de 1.863 kg.ha⁻¹. Pela alta capacidade produtiva e características do grão, BRS Pajeú é uma cultivar de grande aceitação comercial (Freire Filho et al., 2009).

3.3.2. A cultivar 'BRS Marataoã'

A cultivar 'BRS Marataoã' foi obtida pelo cruzamento entre a linhagem TVx1836-013J, introduzida do International Institute of Tropical Agriculture (IITA), em Ibadan, Nigéria, com a cultivar 'Seridó', proveniente do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará. A cultivar que mais se destacou foi a CNCx409-11F, nomeada comercialmente como BRS Marataoã e lançada pela Embrapa Meio-Norte no ano de 2004 (Oliveira et al., 2014).

A cultivar 'BRS Marataoã' apresenta ciclo de maturação médio-precoce de 72 a 77 dias, hábito de crescimento indeterminado, porte semiprostrado, formação de ramos rígidos e não volumosos, evitando o acamamento. A inflorescência é do tipo simples com cálice de cor verde e pétalas de cor roxa, e média de 45 dias para a floração após a semeadura. As vagens imaturas apresentam cor verde-clara e vagens secas apresentam cor amarela clara com comprimento médio de 18 cm e número médio de 14 grãos por vagem (FREIRE FILHO et al., 2004). A arquitetura da planta e a inserção das vagens acima da folhagem facilitam a execução do dessecamento e a colheita mecânica. Os grãos apresentam formato arredondado com tegumento esverdeado e halo verde, porém a coloração não é permanente, tornando o ponto de colheita bem específico, devendo ser realizada imediatamente após a secagem das vagens. Pertencendo à classe comercial

Cores e subclasse Sempre-verde. O peso médio de 100 grãos é de 16,3g (Oliveira et al., 2014).

Esta cultivar apresenta tolerância à mosca-branca (*Bemisia spp.*), resistência moderada à podridão-cinza-do-caule (*Macrophomina spp.*), ao Mosaico transmitido por pulgão (*Cowpea aphid borne mosaic virus*) e ao Mosaico dourado (*Cowpea golden mosaic virus*), resistência à Mancha café (*Colletotrichum truncatum* (Schw.) Andrus & Moore) (Freire Filho et al., 2005b) e ao Mosaico severo do feijão-caupi (*Cowpea severe mosaic virus*), moderada resistência ao Oídio (*Erysiphe polygoni* DC.) e susceptibilidade à Mela (*Thanatephorus cucumeris* (Frank) Donk.). Quanto aos fatores abióticos, a cultivar se mostra moderadamente tolerante a veranicos e à alta temperatura (Freire Filho et al., 2004).

Ensaio para avaliar a produtividade de grãos da cultivar foram realizados em regime de sequeiro na região Nordeste, entre os anos de 1996 e 1998, mostrando que a cultivar teve as maiores produtividades nos estados da Paraíba com média de 1807 kg.ha⁻¹, Bahia com média de 978 kg.ha⁻¹ e Piauí com média de 831 kg.ha⁻¹ (Freire Filho et al., 2004). Entre os anos de 2010 e 2012, o desempenho produtivo da cultivar foi avaliado no Amazonas em ambientes de várzea e floresta de terra firme, alcançando uma média produtiva de 933 kg.ha⁻¹, sendo a maior produção de 1.426,9 kg.ha⁻¹ na região de Rio Preto da Eva em Terra Firme e a menor de 524,6 kg.ha⁻¹ na região de Manaus em terra firme (Oliveira et al., 2014).

3.3.3. A cultivar 'BRS Rouxinol'

A cultivar 'BRS Rouxinol' foi obtida pelo cruzamento entre as linhagens TE86-75-57E e TEx1-69E, realizado na Embrapa Meio-Norte de Teresina, no Piauí. A cultivar que mais se destacou no cruzamento foi a TE90-180-10E, após vários ensaios em diferentes regiões da Bahia, além de avaliações de produtividade e de qualidade de sementes. Foi nomeada comercialmente como BRS Rouxinol e lançada pela Embrapa Meio-Norte no ano de 2002 (Alcântara et al., 2002).

A cultivar 'BRS Rouxinol' apresenta ciclo de maturação médio-precoce de 65 a 75 dias, hábito de crescimento indeterminado, porte semiereto e média de 45 a 55 dias para a floração após a semeadura. A inflorescência é do tipo simples

com cálice de cor verde e pétalas de cor violeta. As vagens imaturas apresentam cor verde-clara e vagens maduras apresentam cor palha com comprimento médio de 19 cm e número médio de 14 grãos por vagem. A arquitetura semiereta em forma de moita e a inserção das vagens acima da folhagem facilitam os tratos culturais e a colheita, sendo uma cultivar indicada para diferentes sistemas de produção. Os grãos apresentam tegumento marrom-claro-esverdeado e halo verde, pertencendo à classe comercial Cores e subclasse Sempre-verde. O peso médio de 100 grãos é de 17 g (Alcântara et al., 2002).

Esta cultivar apresenta imunidade ao vírus do Mosaico severo do feijão-caupi (*Cowpea severe mosaic virus*, do grupo Comovírus), resistência ao vírus do Mosaico transmitido por pulgão (*Cowpea aphid borne mosaic virus*, do grupo Potyvírus) e do Mosaico do pepino (*Cumcumber mosaic virus*), e alta resistência ao vírus do Mosaico dourado (*Cowpea golden mosaic virus*, Geminivírus) (Alcântara et al., 2002).

Foram realizados ensaios pela Embrapa Meio-Norte e pela Empresa Baiana de Desenvolvimento Agrícola (EBDA), entre os anos de 1996 e 1998, para avaliar a produtividade de grãos em oito municípios da Bahia, seis em regime de sequeiro e dois em regime irrigado. A cultivar teve o menor e o maior rendimentos de 237 kg.ha⁻¹ e 1.596 kg.ha⁻¹, respectivamente, para o regime em sequeiro, com rendimento médio de 892 kg.ha⁻¹. Em regime irrigado, o menor e o maior rendimentos foram de 804 kg.ha⁻¹ e 2.215 kg.ha⁻¹, respectivamente, com média de 1.509 kg.ha⁻¹ (Alcântara et al., 2002).

3.4. Demanda Hídrica do Feijão-caupi, Aquecimento Global e a “Pegada Hídrica” (Water Footprint)

Além da infertilidade dos solos e do uso de cultivares não melhoradas, outro fator importante, que leva à baixa produtividade do feijão-caupi no Brasil, é a irregularidade de precipitações pluviométricas e redução na disponibilidade de água doce, subterrânea ou de rios, para a irrigação.

Até um passado próximo, havia poucos estudos científicos e práticas de gestão da água relacionados ao consumo e à poluição da água ao longo das cadeias produtivas e de abastecimento. A organização e as características de um processo produtivo e a cadeia de abastecimento influenciam fortemente os

volumes da água consumida, os quais podem estar associados a um produto de consumo final, porém há pouca consciência sobre isto (Hoekstra et al., 2011).

De acordo com World Water Assessment Programme (WWAP) (2009), a maioria do uso da água é direcionada à produção agrícola. Porém, tem-se observado alterações extremas nos eventos climáticos mundiais, tais como inundações, secas, ciclones, alterando ecossistemas e o abastecimento de água, causando impactos em meios de subsistência, perturbando o bem-estar humano, como também, gerando grande preocupação relacionada à segurança alimentar (IPCC,2014).

No Nordeste brasileiro, onde predomina o cultivo de caupi, é comum a ocorrência de déficits hídricos, sendo este um fator limitante para a cultura, mesmo que considerada, segundo Boyer (1978), como espécie de moderada tolerância à falta ou excesso de água. De acordo com Farias et al. (2017), o feijão-caupi cv. 'BR3-Tracuateua' consome em média, durante seu ciclo, 267,73 mm de água, e em média 3,7 mm.dia⁻¹. Durante suas fases vegetativa, reprodutiva e de senescência, a cultivar apresenta médias de coeficiente da cultura (Kc) de 0,8, 1,4 e 0,8, respectivamente, quando cultivada em condições climáticas semelhantes a da Amazônia Oriental, onde o clima é classificado como equatorial úmido.

Portanto, é de grande importância realizar estudos fenológicos de novas cultivares, para que se possa conhecer as necessidades e os limites de cada uma, planejando adequadamente o futuro da agricultura.

Com as mudanças climáticas, os cenários de escassez hídrica se estenderam para outras regiões do país, como já se observa no estado do Rio de Janeiro (Azevedo, 2002).

De acordo com o IPCC (2014), o efeito estufa promove elevação de 0,14°C na temperatura mundial a cada 10 anos e a estimativa é de que ocorra uma elevação total na faixa de 3,7 a 4,8°C até 2100. Os recursos hídricos subterrâneos e superficiais de regiões subtropicais predominantemente secas serão reduzidos ao longo do século XXI devido às alterações climáticas. Além disso, se houver aumento de 2°C na temperatura média de regiões tropicais e temperadas até o final do século XXI, cultivos de importância como arroz, milho e trigo terão suas produções afetadas negativamente.

Diante do cenário caótico que se espera no futuro, faz-se necessário investir em tecnologias e pesquisas que conservem e aumentem a produtividade das culturas frente às características climáticas futuras.

Uma alternativa recentemente desenvolvida, que tem sido empregada em planejamentos de minimização dos impactos climáticos futuros, é a Eficiência do uso da água ou “Pegada Hídrica” (“Water Footprint”), a qual pode ser considerada como um mecanismo de visualização do uso oculto da água, buscando compreender o caráter global da água potável e a quantificação dos efeitos de seu consumo pelo uso de recursos hídricos (Hoekstra e Chapagain, 2008).

A pegada hídrica (WF) é um indicador de uso da água doce, que considera o uso direto e indireto da água, sendo que o uso indireto de água está relacionado ao consumo de água na cadeia de abastecimento (Herath et al., 2013). O uso da água é medido em termos de volumes de água consumidos, podendo ser incorporados a um produto ou evaporados, ou, ainda, empregados em fase específica do ciclo da cultura como a diluição de agroquímicos e água de reuso. (Hoekstra et al., 2011).

A WF difere do conceito tradicional de Balanço Hídrico e é um indicador multidimensional de uso da água, que mostra em função do tempo e do espaço, os diferentes tipos de consumo da água. O balanço hídrico define o fluxo de água dentro e fora de um sistema, considerando apenas o uso consuntivo da água. A WF também descreve os volumes factíveis de água, incluindo os volumes de água provenientes da chuva (água verde) e de água residual (água cinza), além do volume de água de rios, lagos ou subterrânea usada na irrigação (água azul) (Hoekstra et al., 2011).

A pegada hídrica é expressa em termos de volume de água por unidade de produto ($m^3 \cdot ton^{-1}$ ou $litro \cdot kg^{-1}$), quando se deseja obter o consumo deste produto ou de volume de água por unidade de tempo, quando se visa obter a quantidade de água utilizada em um sistema. Dependendo do nível de detalhe que se pretende fornecer, a pegada hídrica pode ser expressa por dia, mês ou ano (Hoekstra et al., 2011).

3.4.1. Divisões da Pegada Hídrica

3.4.1.1. Pegada Hídrica Azul

A pegada hídrica azul é um indicador do uso consuntivo da água doce superficial ou subterrânea. Ela mede a quantidade de água disponível, que é consumida pela cultura ou que se evapora, em um determinado período, mas que pode não retornar à mesma fonte de captação ou retorna, porém após um longo período de tempo (Hoekstra, 2013). Esta definição de uso da água se refere a quatro casos:

- A água que evapora;
- Água que é incorporada ao produto;
- A água que não retorna para a mesma área de captação, mas seu retorno é direcionado para outra área de captação ou para o mar;
- A água que retorna para a área de captação, porém em um período diferente.

Segundo Hoekstra et al. (2011), o componente mais significativo da pegada hídrica azul é a “Evaporação”, a qual está associada ao termo “uso consuntivo” da água, mas apesar disso, os outros três componentes devem ser levados em consideração.

A pegada hídrica azul ($WF_{proc,blue}$) de um processo é calculada como (Hoekstra et al., 2011):

$$WF_{proc,blue} = \text{Evaporação de Água Azul} + \text{Incorporação de Água Azul} + \text{Fluxo de retorno perdido} \quad (1)$$

O último componente (Fluxo de Retorno Perdido) refere-se à parte de água retirada da fonte de captação, que não está disponível para reutilização na mesma bacia hidrográfica dentro do mesmo período de retirada. Essa indisponibilidade está associada à devolução da água a outra bacia ou mar, ou ao retorno em outro período de tempo (Hoekstra et al., 2011).

A pegada hídrica azul é expressa em unidade de volume de água utilizada em um processo por unidade de tempo (dia, mês ou ano) ou em volume de água

consumida pela cultura por unidade de produto. Em processos agrícolas, para cálculos de pegada hídrica, considera-se o total de água utilizada na irrigação que é retirada da fonte, medindo-se a evapotranspiração total do campo e, posteriormente, estimando-se quanto do total é água azul. Utiliza-se modelos de balanço hídrico com dados de solo, clima, características da cultura e de irrigação para se obter valores de evapotranspiração do campo (Hoekstra et al., 2011).

Diante das mudanças climáticas que vêm ocorrendo, vários pesquisadores por todo o mundo, como Mekonnen e Hoekstra (2010a), Siebert e Dóll (2010) e Zwart et al (2010), iniciaram estudos visando estimar pegadas hídricas azuis e verdes de consumo das culturas como um suporte para o desenvolvimento de novas tecnologias, que busquem usar o mínimo de água na produção sem perder a produtividade.

3.4.1.2. Pegada Hídrica Verde

A pegada hídrica verde é um indicador do uso da água verde, considerada como a água de precipitação que não lixivia para os lençóis freáticos, mas é armazenada no solo ou permanece temporariamente na superfície do solo ou da vegetação. Além disso, o cálculo da pegada hídrica verde leva em consideração o volume de água da chuva consumido durante o processo produtivo (Hoekstra et al., 2011).

O crescimento e a produtividade da cultura podem ser influenciados positivamente pela água verde, porém só será absorvida uma porcentagem dessa água verde pela cultura, já que se deve considerar a evaporação do solo. Para produtos provenientes de colheita ou madeira, este tipo de água tem certa relevância, já que é contabilizada a evapotranspiração total da água da chuva e o volume de água da chuva incorporada à produção (Bocchiola et al., 2013).

A pegada hídrica verde ($WF_{proc,green}$) de um processo é calculada como (HOEKSTRA et al., 2011):

$$WF_{proc,green} = \text{Evaporação de Água Verde} + \text{Incorporação de Água Verde} \quad (2)$$

Os impactos e custos do uso da água da chuva diferem dos impactos e custos do uso de águas superficiais e subterrâneas para a produção, por isso é

importante distinguir a pegada hídrica azul e a verde (Hoekstra e Chapagain, 2008).

Através de um conjunto de fórmulas empíricas ou de um modelo da cultura de interesse que estime a evapotranspiração por dados de características da cultura, clima e solo, pode-se medir o consumo de água verde na agricultura (Hoekstra et al., 2011).

3.4.1.3. Pegada Hídrica Cinza

A pegada hídrica cinza é um indicador do grau de poluição da água doce que pode estar associada à etapa de um processo produtivo. Pode-se definir, também, a pegada hídrica cinza como o volume de água doce necessário para assimilar a carga de poluentes com base nas concentrações naturais de fundo, ou seja, abaixo do valor limite ou ecotoxicológico, e nos padrões de qualidade da água existentes no ambiente. Como esses valores limite não existem para todas as substâncias e nem para todos os países, é obrigatório especificar quais padrões de qualidade da água têm sido usados ao preparar a pegada hídrica cinza (Hoekstra et al., 2011).

O conceito de pegada hídrica cinza iniciou pelo reconhecimento de que a quantidade de poluição da água pode ser expressa pelo volume de água necessário para diluir os poluentes, de forma que eles se tornem inofensivos (Hoekstra et al., 2011).

A pegada hídrica cinza é calculada dividindo-se a carga de poluentes pela diferença entre o padrão de qualidade da água ambiente para aquele poluente e sua concentração natural no corpo d'água (Hoekstra et al., 2011).

A pegada hídrica cinza ($WF_{\text{proc, grey}}$) de um processo é calculada como:

$$WF_{\text{proc, grey}} = \frac{L}{C_{\text{máx}} - C_{\text{Nat}}} \quad (3)$$

A concentração natural (C_{Nat}) em um corpo de água receptor é a concentração que ocorreria se não houvesse interferências humanas na bacia. Para substâncias de fabricação humana que não ocorrem naturalmente na água, $C_{\text{Nat}} = 0$. Quando as concentrações naturais não são conhecidas com precisão,

mas são estimadas como baixas, pode-se assumir $C_{Nat} = 0$. Porém, isso resultará em uma pegada hídrica cinza subestimada (Hoekstra et al., 2011).

A razão de se usar a concentração natural como referência e não a concentração real no corpo d'água receptor é que a pegada hídrica cinza é um indicador da capacidade de assimilação adequada (Hoekstra et al., 2011).

A capacidade de assimilação de um corpo d'água receptor depende da diferença entre a concentração máxima ($C_{máx}$) permitida e a concentração natural de uma substância. Se alguém comparasse a concentração máxima permitida com a concentração real de uma substância, olharia para a capacidade de assimilação restante, que está mudando o tempo todo, em função do nível real de poluição em um determinado momento (Hoekstra et al., 2011).

Os cálculos da pegada hídrica cinza são realizados usando padrões de qualidade da água ambiente para o corpo de água doce receptor, ou seja, padrões relativos às concentrações máximas permitidas. A razão é que a pegada hídrica cinza visa mostrar o volume de água ambiente necessário para assimilar produtos químicos. Os padrões ambientais de qualidade da água são uma categoria específica de padrões de qualidade da água. Outros tipos de padrões são, por exemplo, padrões de qualidade de água potável, padrões de qualidade de irrigação e padrões de emissão (Hoekstra et al., 2011).

Para uma determinada substância, o padrão de qualidade da água ambiente pode variar de um corpo de água para outro. Além disso, a concentração natural pode variar de um lugar para outro. Como resultado, uma determinada carga poluente pode resultar em uma pegada hídrica cinza em um lugar e outra pegada hídrica cinza em outro. Isso é razoável, pois o volume de água necessário para assimilar uma determinada carga de poluentes, realmente será diferente dependendo da diferença entre a concentração máxima permitida e a natural (Hoekstra et al., 2011).

Embora os padrões de qualidade da água ambiental existam na legislação ou tenham que ser formulados por bacia hidrográfica ou corpo de água no âmbito da legislação, eles não existem para todas as substâncias e para todos os lugares. O mais importante é especificar qual padrão de qualidade da água e concentrações naturais serão usados na preparação de um cálculo da pegada hídrica cinza (Hoekstra et al., 2011).

3.4.2. Cálculo da Pegada Hídrica Azul, Verde e Cinza de cultivos de safra ou de silvicultura

Muitos produtos contêm ingredientes da agricultura ou silvicultura. As safras são usadas para alimentos, rações, fibras, combustível, óleos, sabonetes, cosméticos e assim por diante. As árvores e arbustos são usados como madeira, papel e combustível. Uma vez que os setores agrícola e florestal são os principais consumidores de água, os produtos que envolvem a agricultura ou a silvicultura em seu sistema de produção costumam ter uma pegada hídrica significativa (Lovarelli et al., 2016).

Para todos esses produtos, é importante observar particularmente a pegada hídrica do processo de cultivo. O método é aplicável a culturas anuais e perenes, onde as árvores podem ser consideradas uma cultura perene (Lovarelli et al., 2016).

De acordo com Hoekstra et al. (2011), expressam-se as pegadas hídricas dos processos na agricultura ou silvicultura em $\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$. A pegada hídrica total do processo de cultivo de safras ou árvores (WF) é a soma dos componentes verde, azul e cinza:

$$WF_{\text{Proc}} = WF_{\text{green}} + WF_{\text{blue}} + WF_{\text{grey}} \quad [\text{volume/massa}] \quad (4)$$

O componente verde na pegada hídrica do processo de cultivo ($WF_{\text{proc,green}}$, $\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$) é calculado como o componente verde no uso da água da cultura (CWU_{green} , $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) dividido pelo rendimento da colheita (Y , $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$). O componente azul ($WF_{\text{proc,blue}}$, $\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$) é calculado da mesma maneira:

$$WF_{\text{proc,green}} = \frac{CWU_{\text{green}}}{Y} \quad [\text{volume/massa}] \quad (5)$$

$$WF_{\text{proc,blue}} = \frac{CWU_{\text{blue}}}{Y} \quad [\text{volume/massa}] \quad (6)$$

No caso de culturas perenes, deve-se considerar o rendimento médio anual ao longo de toda a vida da cultura. Desse modo, leva-se em consideração o fato de que a produtividade no ano inicial de plantio é baixa ou zero, que as

produtividades são maiores depois de alguns anos e, muitas vezes, diminuem quando a cultura perene entra em senescência. Também, é necessário considerar o uso médio anual da água pela cultura, ao longo do período de vida útil de seu ciclo (Hoekstra et al., 2011).

O componente cinza na pegada hídrica do cultivo ($WF_{proc, grey}$, $m^3 \cdot ton^{-1}$) é calculado como a taxa de aplicação de produtos químicos no campo por hectare (AR , $Kg \cdot ha^{-1}$) multiplicada pela fração de escoamento de lixiviação (α), dividido pela concentração máxima aceitável (C_{max} , $Kg \cdot m^3$), menos a concentração natural para o poluente considerado (C_{nat} , $Kg \cdot m^3$) e, então, dividido pelo rendimento da colheita (Y , $ton \cdot ha^{-1}$):

$$WF_{proc, grey} = \frac{(\alpha \times AR) / (C_{max} - C_{nat})}{Y} \quad [\text{volume/massa}] \quad (7)$$

Os poluentes geralmente consistem em fertilizantes, pesticidas e inseticidas. Deve-se considerar apenas o fluxo de resíduos para corpos de água doce, que geralmente é uma fração da aplicação total de fertilizantes ou pesticidas no campo. É necessário contabilizar apenas o poluente mais crítico, ou seja, o poluente cujo cálculo acima produz o maior volume de água (Hoekstra et al., 2011).

3.4.3. Pegada Hídrica Média Total (WF_{Proc}) das principais culturas de interesse econômico

De acordo com Mekonnen e Hoekstra (2010a), a pegada hídrica média por tonelada de cultura apresenta diferença significativa entre as culturas e entre as regiões de produção. Culturas com alto rendimento ou com colheita de grande parte da biomassa, geralmente têm uma pegada hídrica menor por toneladas e comparada às culturas com baixo rendimento ou colheita de pequena parte de sua biomassa.

As culturas com pegadas hídricas consideradas relativamente grandes por tonelada de produto são: café, chá, cacau, tabaco, especiarias, nozes, borracha e fibras. Para culturas alimentares, a pegada hídrica média global por tonelada de produto apresenta algumas variações: açúcar (cerca de $200 m^3 \cdot ton^{-1}$), vegetais

(~300 m³.ton⁻¹), raízes e tubérculos (~400 m³.ton⁻¹), frutas (~1000 m³.ton⁻¹), cereais (~1600 m³.ton⁻¹), oleaginosas (~2400 m³.ton⁻¹), leguminosas (~4000 m³.ton⁻¹), especiarias (~7000 m³.ton⁻¹) e nozes (~9000 m³.ton⁻¹) (Mekonnen e Hoekstra, 2010a; Silva et al., 2016).

A variação da pegada hídrica de diferentes culturas ocorre por categoria de cultura. A pegada hídrica também pode variar se seus valores forem expressos em kcal. As pegadas hídricas de legumes e frutas, por exemplo, são relativamente pequenas ao serem expressas em kg, mas quando expressas em kcal, apresentam pegada hídrica relativamente grande (Hoekstra et al., 2011).

A pegada hídrica média para as culturas de cereais é de 1644 m³.ton⁻¹, mas a pegada do trigo é relativamente grande (1827 m³.ton⁻¹), enquanto que para o milho é relativamente pequena (1222 m³.ton⁻¹). A pegada hídrica média do arroz está próxima da média de todos os cereais juntos (Mekonnen e Hoekstra, 2010a).

De acordo com FAO (2008), a média global total da pegada hídrica do feijão-caupi é de 6906 m³.ton⁻¹, sendo 6841 m³.ton⁻¹ de água verde, 10 m³.ton⁻¹ de água azul e 55 m³.ton⁻¹ de água cinza. Esses valores mostram a importância das chuvas para a cultura e, também, da inclusão do componente (WF_{verde}) em estudos de gestão da água, como vários autores recomendam (Hoff et al., 2010; Vanham, 2012).

3.5. Efeitos do déficit hídrico sobre as características morfológicas e fisiológicas

Para que um cultivo seja produtivo e de qualidade, alguns fatores, como o déficit hídrico, devem ser levados em consideração. A escassez hídrica é um dos agentes abióticos mais agravantes, afetando diversos processos fisiológicos das plantas e influenciando o sucesso da lavoura (Endres et al., 2010).

Porém, muitos trabalhos apontam tolerância de cultivares de feijão-caupi submetidas a sistemas de irrigação com regimes hídricos reduzidos, indicando a importância de estudos de melhoramento genético para a produção agrícola (Nascimento et al, 2011; Pereira Filho, 2017; Oliveira, 2020).

Fatores como cultivar, características do solo e tempo de exposição à escassez hídrica podem influenciar as respostas das plantas ao estresse hídrico

(Nascimento et al, 2011), reduzindo ou aumentando a tolerância destas às condições de deficiência hídrica. Observa-se que esta tolerância é evidenciada por mais de uma variável fisiológica, indicando a necessidade de se avaliar outras características como condutância estomática, transpiração, temperatura foliar e potencial hídrico (Nogueira et al., 2001).

Souza et al. (2020) avaliando frequências de irrigação e densidades de plantas em feijão comum, constataram que estas duas variáveis afetam demasiadamente as características biométricas e de síntese de clorofila do feijão.

Os efeitos do estresse hídrico em feijoeiro são mais graves nas fases de floração e frutificação, além de reduzir a produtividade (Souza et al., 2009). Segundo Mendes et al. (2007), cultivares de feijão-caupi apresentam reduções no potencial hídrico foliar, na condutância estomática e na transpiração foliar ao serem submetidas a déficit hídrico nas fases vegetativa e reprodutiva.

Oliveira et al. (2005), avaliando plantas de feijão submetidas a condições de déficit hídrico, verificaram que há aumento da resistência à difusão de vapor das folhas e diminuição da condutância estomática, quando as plantas se encontram em ambientes de escassez hídrica. A transpiração da planta diminui, levando à redução do suprimento de CO₂ usado nos processos fotossintéticos, devido ao fechamento dos estômatos.

Para o tomateiro e a acácia, valores de potenciais hídricos da folha de -1 e -6,0 MPa, respectivamente, são considerados letais para estas culturas. Para o feijão-comum e o feijão-caupi, estes valores são de -1,5 a -2,5 MPa, respectivamente, classificando estas culturas como plantas sensíveis e moderadamente tolerantes ao déficit de água no solo (Boyer, 1978).

Devido à restrição hídrica, o fluxo de água no sentido solo-planta-atmosfera é reduzido, diminuindo a absorção de nutrientes pela planta e, conseqüentemente, promovendo alterações anatômicas e morfológicas na planta, como a redução do crescimento e diminuição no número de folhas. (Coelho et al., 2013).

Em estudos com aplicações hídricas de 40, 60, 80 e 100% da evapotranspiração da cultura (ETc), os valores para altura de planta são proporcionalmente crescentes à disponibilidade de água no solo (Carvalho et al., 2016).

Silva et al. (2013) encontraram diferenças nos valores de matéria seca da parte aérea de cultivares submetidas a estresse hídrico e salino. Os resultados indicam o déficit hídrico e a salinidade, que podem promover redução na produção de biomassa total e alterar a partição de fotoassimilados nas diferentes partes da planta.

O estresse hídrico, quando aplicado na fase de maturação dos grãos, pode ser favorável para o feijoeiro, pois nesta fase, as vagens iniciam o processo de secagem, sendo a escassez hídrica uma estratégia contribuinte para o rendimento da cultura (Hegab et al., 2014; Satriani et al., 2015).

Diante da reduzida disponibilidade hídrica atual, é importante conhecer o comportamento das cultivares sob determinadas condições, como as de estresse hídrico, visando o melhor planejamento do uso da água.

3.6. O Nitrogênio e sua Fixação Biológica no Feijão-Caupi

O nitrogênio (N) é um elemento químico componente de aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos, e está diretamente relacionado ao crescimento das plantas, sendo considerado um macronutriente limitante, ou seja, sem a presença deste, o desenvolvimento da planta é prejudicado (Malavolta, 1997). A falta do nitrogênio reduz as características morfológicas das plantas, por ser o nutriente de maior demanda por estes organismos, já que compõe macromoléculas importantes para o desenvolvimento vegetal, como a clorofila, que é responsável por captar a energia solar usada na fotossíntese (Martins et al., 2017).

Na atmosfera, o nitrogênio (N) pode ser encontrado nas formas moleculares N_2 (gás nitrogênio), N_2O (óxido nitroso), NO (óxido nítrico), NO_2 (dióxido de nitrogênio) e NH_3 (amônia) (Nelson e Cox, 2014). No solo, o N está presente de três formas: íons amônio (NH_4^+), íons nitrato (NO_3^-) e compostos orgânicos nitrogenados (Taiz et al., 2017).

A fonte primária de nutrientes para as plantas é o solo, cuja parte sólida é formada por compostos inorgânicos e matéria orgânica. A fração inorgânica é proveniente da atmosfera e do intemperismo das rochas, já a parte orgânica deriva de restos vegetais e animais em diferentes estádios de decomposição, sendo o material totalmente decomposto denominado como húmus. Em condições favoráveis de luz, temperatura e umidade, fungos, bactérias e outros

microrganismos se instalam e se multiplicam, tornando-se os principais protagonistas da decomposição dos materiais depositados no solo (Raven et al., 2014).

Para que o nitrogênio possa ser utilizado pelas plantas, é preciso que haja a sua fixação, precedendo a entrada deste no Ciclo do Nitrogênio (Taiz et al., 2017).

A Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) é uma das formas de fixação deste nutriente. Nela, os microrganismos presentes no solo realizam a redução enzimática do N_2 para NH_3 . Parte destes microrganismos é composta por microrganismos diazotróficos simbiotes (*Rhizobium*, *Bradyrhizobium*), ou seja, formam associações com plantas, fornecendo a estas o nitrogênio que captam da atmosfera; a outra parte é formada por diazotróficos não simbiotes (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*, *Pseudomonas*), que armazenam N em sua biomassa, sendo liberado, na forma mineral, após a decomposição desta (Raven et al., 2014).

O feijão-caupi demanda quantidades superiores a $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ para seu completo desenvolvimento, sendo um dos nutrientes de maior exigência pela cultura (Leite et al., 2009). Apesar da fixação biológica de nitrogênio e da adubação orgânica, o setor agrícola vem utilizando fertilizantes minerais nitrogenados para aumentar a produtividade nas lavouras e suprir a deficiência de nitrogênio, já que este nutriente é muito móvel no solo, sendo facilmente lixiviado ou volatilizado, além de assumir outras formas que não são assimiladas pelas plantas. Esse tipo de manejo é feito de forma desordenada, levando ao excesso deste nutriente em solos com agricultura convencional, e conseqüentemente, causando impactos ambientais, como contaminação de lençóis freáticos (Carvalho e Zobot, 2012).

Uma alternativa para reduzir os impactos ambientais e econômicos gerados pelo uso excessivo de fertilizantes minerais nitrogenados, é a utilização de bactérias fixadoras de Nitrogênio em feijão-caupi pelo processo de inoculação das sementes (Brito, 2013).

Rhizobium e *Bradyrhizobium* são as bactérias fixadoras de nitrogênio (BFN) mais comuns presentes no solo, apesar de não serem as únicas responsáveis pela quantidade total de nitrogênio fixado (Ramírez et al., 2020). Ambas colonizam as raízes de leguminosas como feijão, soja, amendoim e

ervilha, estabelecendo uma relação simbiótica com elas, formando estruturas denominadas nódulos. As raízes são propícias para o desenvolvimento destes microrganismos, disponibilizando moléculas carbônicas, produzidas nos processos fotossintéticos, as quais são fontes de energia para a atividade de fixação do nitrogênio. Em contrapartida, estas bactérias, disponibilizam o nitrogênio, em forma assimilável pela planta, para que esta possa utilizá-lo na síntese de proteínas e de outros compostos nitrogenados (Taiz et al., 2017).

As leguminosas, por si só, não têm capacidade de assimilar o N_2 atmosférico, mas por meio da simbiose com as BFN, o mesmo é transformado em amônia (NH_3) no complexo enzimático denominado Nitrogenase. Nesta enzima, à pressão normal e temperatura ambiente, as ligações químicas da molécula de N_2 são quebradas. Todo este processo ocorre nos nódulos, os quais são formados após trocas de sinais entre a planta e as BFN. A formação dos nódulos se inicia quando uma planta de leguminosa excreta no solo, substâncias químicas que agem quimiotaticamente sobre as BFN, que colonizam as raízes da planta (Brito, 2013).

Diante de sua rusticidade, boa adaptação aos solos de baixa fertilidade e baixo pH, ser capaz de fixar nitrogênio atmosférico pela interação com microrganismos diazotróficos simbiotes formando nódulos, o feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) tem se mostrado ser uma cultura de grande importância para a agricultura brasileira, pelo alto valor nutricional de seus grãos e pelo baixo custo inicial de produção, podendo ser uma ótima alternativa para a segurança alimentar e geração de renda (Araújo, 2019).

3.7. Inoculação de feijão-caupi com microrganismos fixadores de nitrogênio visando maior produtividade de grãos

Rocha et al. (2019), comparando adubação mineral nitrogenada com a inoculação de uma estirpe de rizóbio em sementes de feijão-caupi, verificaram que a produtividade foi maior no tratamento com inoculante. A produtividade média obtida com a inoculação das sementes de feijão-caupi mostrou-se uma ótima alternativa em substituição à adubação mineral com ureia, proporcionando maior ganho produtivo para a cultura.

Resultados similares para produtividade de grãos, também foram obtidos por Santos et al. (2020) ao avaliar a inoculação simultânea de feijão-caupi com isolados de rizóbio e *Trichoderma*. A inoculação das sementes com rizóbio, seguida de reinoculação com *Trichoderma*, aos 25 dias após a semeadura promoveu aumento de produtividade nas três variedades estudadas (cv. Vinagre, cv. Fradinho e cv. Sempre Verde). Os autores afirmam a importância da aplicação de rizóbio para o desenvolvimento do sistema radicular.

Brito (2013), ao avaliar a fase inicial em cultivares de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.), verificou que o feijoeiro, quando inoculado, apresenta valores de produtividade tão ótimos quanto o feijoeiro não inoculado com suplementação de N mineral.

Em contrapartida, Silva et al. (2019), avaliando os efeitos de diferentes fertilizantes orgânicos, adubação mineral e inoculação com rizóbio, verificaram que a suplementação orgânica e o inoculante, isolados ou associados, não contribuem para o aumento de produtividade do feijão-caupi. O tratamento com a adubação mineral foi o que proporcionou o maior valor de produtividade de grãos. Provavelmente, as produtividades obtidas nos tratamentos com inoculante e/ou adubação orgânica estejam relacionadas à competição entre as bactérias do inoculante e as bactérias existentes no solo, assim como a baixa quantidade de elementos minerais presentes nos adubos orgânicos.

Santos et al. (2019), avaliando duas estirpes rizobianas e doses de fósforo em duas cultivares de feijão-caupi, observaram que houve interação das estirpes com as doses crescentes de fósforo, obtendo-se a máxima eficiência agrônômica do feijoeiro-caupi. Segundo Rocha et al. (2018a), a adubação fosfatada proporciona maior atividade simbiótica, provavelmente, pela contribuição do fósforo no desenvolvimento radicular e formação dos nódulos.

Contudo, fazem-se necessários estudos para avaliar a influência do déficit hídrico sobre o conteúdo de N na planta e na semente de feijão-caupi.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Experimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação com o feijão-caupi, na Unidade de Apoio à Pesquisa, Ensino e Extensão – no Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA), da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, situada no município de Campos dos Goytacazes/RJ. A instalação consistiu de casa de vegetação coberta com polietileno de baixa densidade (PEBD), ambiente controlado quanto à precipitação.

O município de Campos dos Goytacazes/RJ situa-se a 21°45' de latitude Sul e 41°20' W de longitude Oeste nas coordenadas geográficas, e altitude média de 11,0 m. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Aw, que se caracteriza por ser tropical, quente e úmido, com período seco no inverno e chuvoso no verão (Silva et al., 2015). A precipitação pluviométrica média anual é de 1023 mm e a umidade relativa do ar anual média de 76,5%. A temperatura média anual da região é de 23,7 °C, com média mínima de 21,4 °C em junho e julho, e média máxima de 27,7°C em fevereiro (Oliveira,1996). A última Normal Climatológica do Município (1981-2010) registrou temperatura média em torno de 24,4°C, com precipitação média anual de 1007,5 mm, podendo apresentar veranicos nos meses de janeiro e fevereiro (INMET, 2020).

Durante o experimento, a cada 30 minutos foram coletadas as variáveis climatológicas diárias no interior da casa de vegetação (temperatura e umidade

relativa) pelo sensor Data Logger HOBO Pro V2 by Onset U23-001A em um abrigo meteorológico (Figura 1) instalado a um metro de distância do experimento. A partir dos valores obtidos foram calculadas as médias diárias (Figura 2).

O experimento seguiu o arranjo fatorial (3 x 4), sendo três cultivares de feijão-caupi ['BRS Pajeú' (G18), 'BRS Marataoã' (G19) e 'BRS Rouxinol' (G20)] e quatro turnos de rega (T2 = irrigação a cada 2 dias; T4 = a cada 4 dias; T6 = a cada 6 dias e T8 = a cada 8 dias). O delineamento foi feito em blocos casualizados com quatro repetições, totalizando 12 unidades experimentais em cada bloco. Entretanto, o experimento foi realizado em duplicata, sendo adicionado ao lado de cada unidade experimental, outra unidade experimental com os mesmos tratamentos, assim totalizando 24 unidades experimentais por bloco (Figura 3).

As unidades experimentais foram constituídas por um vaso de 5 L (dimensões: diâmetro superior = 21 cm, diâmetro inferior = 18 cm, altura = 20 cm), preenchido com substrato comercial Basaplant[®] Hortaliças BX (pH = 5,8±0,5; C.E. = 2,5±0,3 mS/cm; CRA = 150% p/p; densidade = 350 kg m⁻³; umidade: 36%; N = 0,38%; P₂O₅ = 0,23%; K₂O = 0,28%; Ca = 0,21%; Mg = 0,09%; S-SO₄ = 0,10%; C = 9,06%; Fe = 5222 mg dm³; Cu = 13 mg dm³; Zn = 18 mg dm³; Mn = 84 mg dm³).

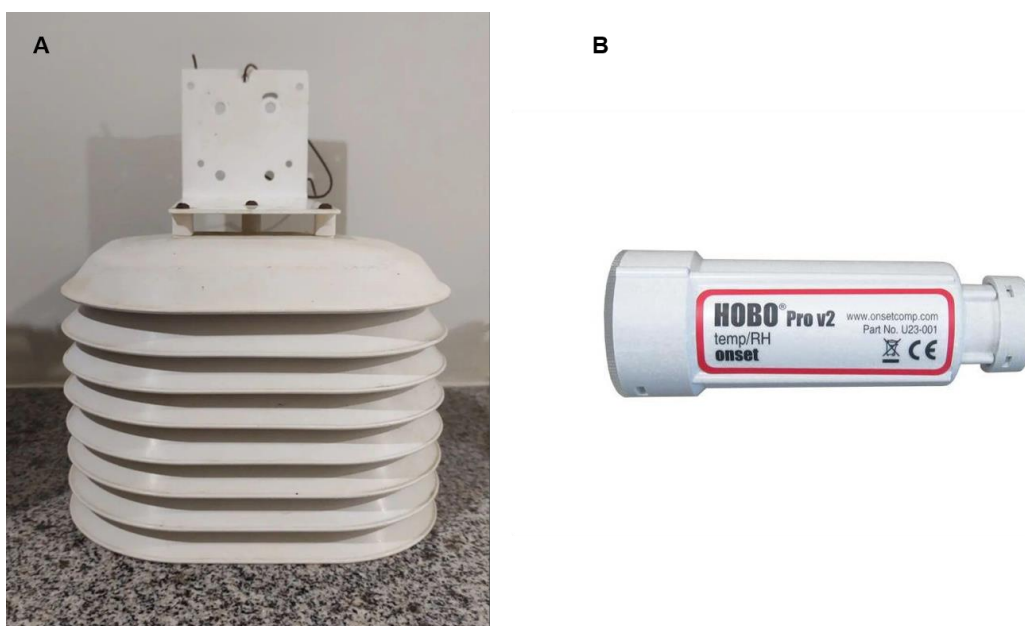


Figura 1. Abrigo meteorológico RS1 para proteger o datalogger de temperatura e da umidade relativa em locais expostos à radiação solar direta ou refletida (A). Sensor Data Logger HOBO Pro V2 by Onset U23-001A (B).

As sementes das cultivares de feijão-caupi utilizadas no estudo foram fornecidas pelo banco de sementes de feijões especiais do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas da UENF.

O volume de água aplicado em cada irrigação tinha como referência o volume da capacidade de pote. Para obter a capacidade de pote foi adotado o método de conteúdo de água no substrato, após sofrer saturação por meio da ação da gravidade, até o cessamento da drenagem (Souza et al., 2000). Para isso, foram coletados 3 kg do substrato utilizado no experimento e realizou-se a secagem do mesmo ao sol, com nova pesagem ao fim da secagem.

Posteriormente, o substrato foi colocado em vaso com orifícios no fundo, e este colocado sobre uma bandeja plástica resistente. O conjunto foi colocado em um suporte elevado e a bandeja plástica foi conectada por uma mangueira de silicone de 1/2" a um recipiente de plástico com tampa, onde a água percolada se depositou. O substrato foi saturado com água e o sistema foi deixado, sem interferências por 12h, até cessar a drenagem. O substrato foi novamente pesado para obtenção de sua massa. A água percolada foi coletada e mediu-se seu volume. O mesmo sistema foi utilizado em todos os vasos durante o experimento (Figura 4) para coletar o volume de água percolado a cada irrigação, e posteriormente, ser estimada a pegada hídrica de cada cultivar em estudo.

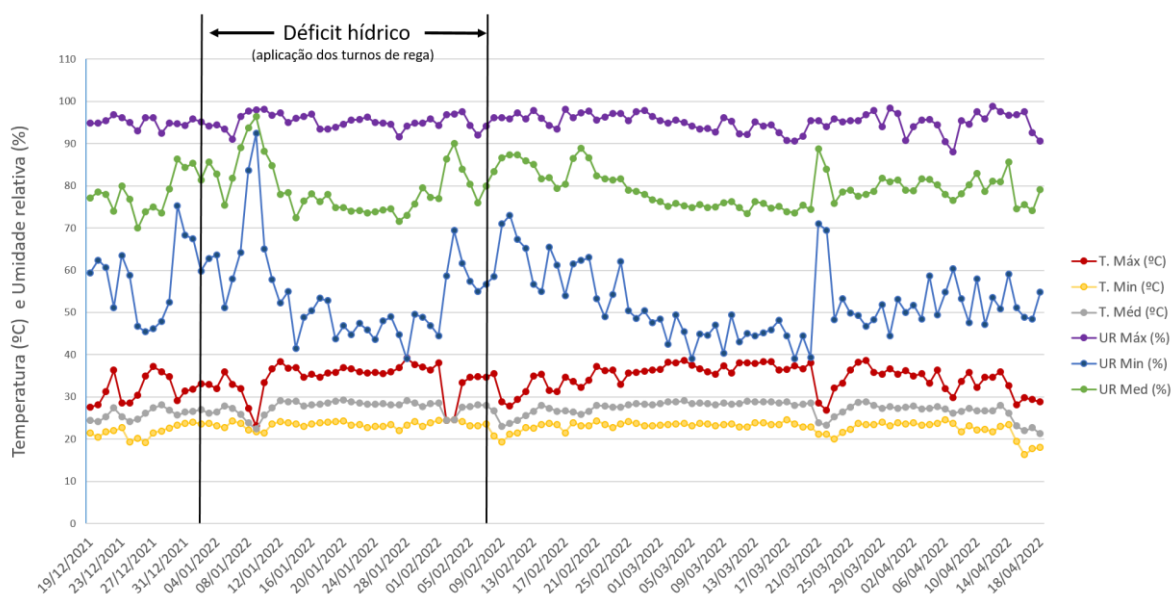


Figura 2. Temperatura máxima (T.Máx), temperatura mínima (T.Min), temperatura média (T.Méd), umidade relativa máxima (UR Máx), umidade relativa mínima (UR Min) e umidade relativa média (UR Med) durante o período de condução do experimento.

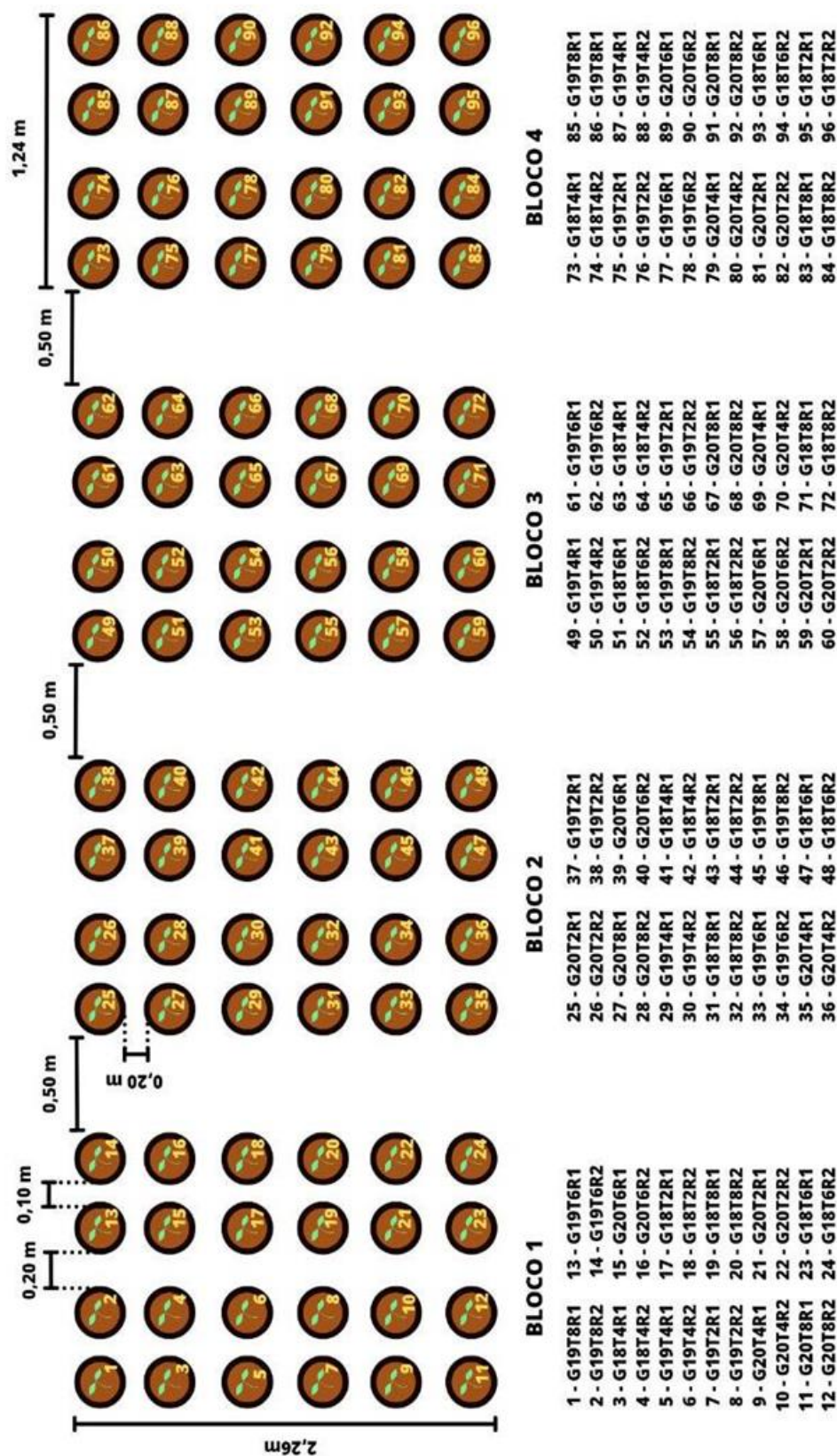


Figura 3. Esquema da área utilizada para o experimento, com disposição dos genótipos, turnos de rega e duplicatas.

Foram utilizados vasos teste para monitorar o volume de água a ser aplicado em cada turno de rega. Foram 12 vasos teste contendo a mesma configuração do experimento (2 plantas por vaso da cultivar específica e o turno de rega a ser aplicado) e mesmo sistema para coleta da água percolada. Era feita aplicação de um volume de água próximo a capacidade de pote, observando o início da percolação. Caso a percolação não fosse iniciada, eram feitas adições de volumes menores até ser observado o início da percolação. Iniciada a percolação, os volumes totais aplicados em cada vaso teste eram aplicados nos vasos equivalentes com mesmo tratamento em cada bloco experimental. A água percolada de cada vaso era medida em proveta volumétrica graduada de 1000mL, armazenada e reutilizada nas irrigações seguintes, evitando a perda de nutrientes lixiviados.



Figura 4. Sistema para coleta da água percolada.

O experimento em duplicata foi caracterizado por duas fases: fase 1 - período da semeadura ao final do estágio V4 (0 a 52 dias após a semeadura) e fase 2 - período do início do estágio V5 a senescência (52 a 120 dias após a semeadura). Na fase 1, todas as plantas passaram por avaliações morfofisiológicas e aos 52 dias após a semeadura (DAS), as plantas das duplicatas foram coletadas, para análises destrutivas. Na fase 2, as plantas remanescentes foram conduzidas até o final do ciclo da cultura para estimar a produtividade.

O experimento foi implantado no dia 19 de dezembro de 2021. Após o preenchimento dos vasos com substrato, foi feita saturação com água até a capacidade de campo.

As sementes foram previamente inoculadas com inoculante comercial líquido *TotalNitro* para feijão-caupi da empresa *Total Biotecnologia Indústria e Comércio S/A*, contendo *Bradyrhizobium elkanii*, estirpe BR-3267 (SEMIA 6462) e *Bradyrhizobium* sp, estirpe INPA 3-11B (SEMIA 6463), na concentração 2×10^9 UFC.mL⁻¹. Como descrito no rótulo do produto, foi utilizada a dosagem de 100 mL do inoculante para cada 50 kg de sementes. As sementes foram misturadas ao inoculante e semeadas em sequência na profundidade de 3 a 4 cm.

Em cada vaso, foram dispostas três sementes da cultivar equivalente e 10 dias após a semeadura (DAS), foi feito desbaste das plantas menos vigorosas, deixando-se duas plantas por vaso.

Todas as plantas foram mantidas na capacidade de pote, com irrigações realizadas diariamente, até 80%, dos vasos apresentarem plantas com a nervura central do folíolo central da primeira folha trifoliolada medindo cerca de 10 cm de comprimento, quando foram iniciados os turnos de rega.

Os turnos de rega foram iniciados aos 14 dias após a semeadura (DAS) e conduzidos até os 52 DAS, quando foi removido um dos vasos de cada uma das parcelas duplicadas para serem conduzidos às avaliações destrutivas. Aos 53 DAS, todos os vasos remanescentes voltaram a ser irrigados igualmente adotando-se o turno de rega de 2 dias como controle até a senescência das plantas.

O início do florescimento foi desuniforme entre os blocos e entre as cultivares, mas as primeiras flores foram observadas aos 38 DAS para 'BRS Pajeú' no turno de rega T2; aos 40 DAS para 'BRS Pajeú' no turno de rega T4; aos 42 DAS para 'BRS Marataoã' com T2; aos 45 DAS para 'BRS Rouxinol' com T2 e T4; aos 48 DAS para 'BRS Marataoã' com T4 e 'BRS Pajeú' com T6; aos 52 DAS para 'BRS Pajeú' com T8 e 'BRS Marataoã' com T6; aos 56 DAS para 'BRS Marataoã' com T8 e 'BRS Rouxinol' com T6; e aos 61 DAS para 'BRS Rouxinol' com T8.

Foram realizadas quatro colheitas, sendo a primeira aos 82 DAS e a última aos 120 DAS. Foram colhidas as vagens secas; não foi utilizado dessecante.

Os tratos culturais foram efetuados conforme a necessidade da cultura, seguindo as recomendações de Andrade Júnior et al. (2002).

Aos 58 DAS, foram observados sintomas de senescência precoce com número acentuado de abortos e abscisão foliar, motivos pelos quais foram feitas duas aplicações de 300mL de solução nutritiva em cada vaso (aos 60 DAS e aos 67 DAS), com o objetivo de reestabelecer as plantas após o período de déficit hídrico. A solução foi preparada de acordo com a formulação indicada por Hoagland e Arnon (1950). Com condutividade elétrica de 2,0 mS cm⁻¹ e pH mantido na faixa entre 5,5 e 5,8, ajustado com uso de Ácido clorídrico (1 mol L⁻¹) e Hidróxido de sódio (1 mol L⁻¹).

Os sais utilizados para o preparo das soluções estoques foram: nitrato de potássio (2 mol L⁻¹), nitrato de cálcio (2 mol L⁻¹), fosfato de amônio (1 mol L⁻¹), sulfato de magnésio (1 mol L⁻¹), sulfato de amônio (1 mol L⁻¹), ferro EDTA (25 g L⁻¹), sulfato de zinco (578 mg L⁻¹), sulfato de cobre (250 mg L⁻¹), sulfato de manganês (845 mg L⁻¹), cloreto de potássio (3728 mg L⁻¹), molibdato de amônio (88 mg L⁻¹) e ácido bórico (25 mM L⁻¹). A Tabela 2 indica a composição final da solução nutritiva utilizada, feita a partir da solução proposta por Hoagland e Arnon (1950).

Tabela 2. Composição da solução nutritiva a partir da solução proposta por Hoagland e Arnon (1950)

K ⁺ (mM)	NH ₄ ⁺ (mM)	Ca ²⁺ (mM)	Mg ²⁺ (mM)	NO ₃ ⁻ (mM)	P (mM)	SO ₄ ²⁻ (mM)	Fe (μM)	Mn (μM)	Cu (μM)	Zn (μM)	B (μM)	Mo (μM)
5	2	4	2	14	1	2,5	4	5	1	2	25	0,5

4.2. Avaliações Morfofisiológicas e componentes de Produtividade

4.2.1. Avaliações Morfológicas

As avaliações morfológicas ocorreram aos 51 DAS, sendo realizadas ao final da fase 1, com a finalidade de comparar as alterações geradas pelo déficit hídrico. Foram avaliadas as seguintes características relacionadas com a arquitetura da planta:

- a) **Comprimento da nervura central da folha Diagnóstica (D)** – foram medidas as nervuras centrais dos 3 folíolos da folha D, com auxílio de régua milimetrada, e feita uma média dos valores obtidos. A folha D é considerada como a terceira folha, a partir do ápice, em pleno estágio de crescimento (Boaretto et al., 2009);
- b) **Número de folhas** – foram contabilizadas, manualmente, todas as folhas trifolioladas das plantas utilizadas nas análises destrutivas;
- c) **Área foliar** – as plantas foram coletadas no início da manhã, para evitar murchamento das folhas, colocadas em bandejas plásticas. Posteriormente, a parte aérea foi separada da raiz, sendo as folhas juntamente com seus respectivos pecíolos analisados pelo aparelho de medição de área foliar LICOR modelo LI-3100C com resolução de 0,1 mm²;
- d) **Área foliar da folha D** – a folha diagnose foi avaliada separadamente das demais folhas no mesmo aparelho de medição de área foliar;
- e) **Comprimento da haste principal** – foi medida a altura das plantas utilizadas nas análises destrutivas, com auxílio de trena milimetrada. As medições foram feitas do substrato até o meristema apical das plantas;
- f) **Diâmetro da haste principal** – mediu-se o diâmetro da haste principal há 5 centímetros da superfície do substrato com auxílio de paquímetro digital;
- g) **Comprimento do sistema radicular** – foi medido o comprimento do sistema radicular com auxílio de trena milimetrada. As medições foram feitas do ponto mais alto de inserção das raízes secundárias na raiz principal até a extremidade final do sistema radicular;

- h) Massa Fresca da Parte Aérea** – Após as medições de área foliar, as folhas juntamente com a haste principal foram pesadas em balança analítica, obtendo-se o peso de matéria fresca da parte aérea;
- i) Massa Seca da Parte Aérea** – As partes aéreas foram acondicionadas em sacos de papel e levadas à estufa com circulação de ar forçada a 70°C, por 72 horas. Após este período de secagem, as amostras foram novamente pesadas em balança analítica para determinação da massa de matéria seca, e em seguida, foram moídas em moinho tipo Wiley, com peneira de 20 malhas por polegada. O material vegetal moído foi utilizado na determinação do teor de nitrogênio (N) amoniacal presente na parte aérea.

4.2.2. Avaliações Fisiológicas

As avaliações fisiológicas ocorreram aos 38 DAS. Foram avaliadas as seguintes características:

- a) Teor de Clorofila Total** - esta característica foi medida indiretamente pela intensidade de cor verde estimada pelo aparelho Clorofilômetro Soil Plant Analysis Development, mais conhecido como SPAD-502 (Minolta, Japão). As medições foram feitas ao meio-dia. Foram feitas três medições na folha D, evitando as bordas e a nervura central, para se obter as médias;
- b) Emissão da Fluorescência da Clorofila** - Esta característica determina o rendimento quântico máximo do fotossistema II (Fv/Fm). As avaliações foram feitas no mesmo horário e nos mesmos folíolos utilizados para as medições do teor de clorofila. As medições foram feitas com auxílio do fluorímetro Pocket PEA (Plant Efficiency Analyser, Hansatech, Inglaterra). Para este propósito, foram adaptadas aos folíolos amostrados, pinças constituintes do próprio equipamento de medição (leafclips). Tais pinças simulam uma câmara escura, onde a área avaliada do folíolo permanece por 30 minutos antes de serem feitas as leituras com o fluorímetro. Essa adaptação ao escuro torna-se

necessária para que os centros de reação adquiram a condição de “abertos” (Qa oxidada) (Bolhár-Nordenkampf et al, 1989);

- c) Índice de Desempenho Fotoquímico** - O índice de desempenho fotoquímico (PI_{abs}) relaciona a eficiência de absorção, captura e transferência de energia de excitação pelo fotossistema II proporcionando uma visão maior do grau de efeito do ambiente estressante (Gonçalves e Santos Jr., 2005). As avaliações foram feitas no mesmo horário e nos mesmos folíolos utilizados para as medições de fluorescência e teor de clorofila. Os dados para essa variável foram obtidos no mesmo momento e condições que os dados de Emissão da Fluorescência da Clorofila, com auxílio do fluorímetro Pocket PEA (Plant Efficiency Analyser, Hansatech, Inglaterra);
- d) Potencial Hídrico Foliar (Ψ_f)** - Para esta análise, foram selecionadas as folhas localizadas no terço médio da planta, sendo feitas duas avaliações (na antemanhã e ao meio-dia) antes da última aplicação de turno de rega. Foi utilizada a Câmara de Pressão de Scholander, segundo Scholander et al. (1965);
- e) Condutância Estomática** – As medições foram feitas entre 11h e 12h na folha D, evitando as bordas e a nervura central, sendo uma medição por planta. Foi utilizando o aparelho porômetro “SC-1 Leaf Porometer” Decagon Devices, disposto em posição perpendicular à luz solar incidente na superfície foliar. Os valores foram obtidos em $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$.

4.2.2. Teor de N amoniacal na parte aérea e na semente

4.2.2.1. Teor de N amoniacal na parte aérea

Do material vegetal seco e moído, foi pesado 1 mg de cada amostra com auxílio de balança analítica e transferido para tubos de ensaio para determinação do teor de nitrogênio amoniacal (N, g Kg^{-1}) na parte aérea. As amostras foram submetidas à digestão sulfúrica, e o N foi determinado pelo método de Nessler (Jackson, 1965) por leitura em espectrofotômetro de fluxo Specord 2010, AnalytikJena, no setor de Nutrição Mineral de Plantas do Laboratório de Fitotecnia da UENF.

4.2.2.2. Teor de N amoniacal na semente

Após a colheita, as sementes foram pesadas em balança analítica para obter a massa fresca, acondicionadas em sacos de papel e levados à estufa com circulação de ar forçada a 70°C, por 72 horas. Após este período de secagem, as amostras foram novamente pesadas em balança analítica para determinação do peso de matéria seca. Em seguida, as sementes foram moídas em moinho tipo Wiley, com peneira de 20 malhas por polegada e repetido o processo de digestão sulfúrica e determinação do conteúdo de N amoniacal utilizado para a parte aérea.

4.2.3. Avaliações de componentes de produtividade e Pegada Hídrica Azul

Para fins de produtividade, foram contabilizados o número de vagens por planta, número total de grãos por planta, peso total de grãos frescos por planta (g), peso total de grãos secos por planta (g) e produtividade de grãos secos (kg ha⁻¹). Após a colheita, as vagens foram contadas e debulhadas, as sementes foram contadas e pesadas em balança analítica para obter a massa fresca. Em seguida, as sementes foram acondicionadas em sacos de papel e levadas à estufa com circulação de ar forçada a 70°C, por 72 horas. Após este período de secagem, as amostras foram novamente pesadas em balança analítica para determinação do peso de matéria seca.

4.2.4. Cálculo da Pegada Hídrica Azul

Pelo método de conteúdo de água no substrato, obtiveram-se as massas do substrato antes da secagem (3,038 kg), após a secagem (2,492 kg), volume de água aplicado para hidratar o substrato (VA, 3L) e o volume percolado (VP, 1,5 L). O volume retido no substrato foi considerado como a capacidade de pote (CP), que foi calculado pela diferença entre VA e VP:

$$\text{Capacidade de Pote (CP)} = \text{Volume Aplicado (VA)} - \text{Volume Percolado (VP)} \quad (8)$$

Durante todo o experimento, as regas foram feitas utilizando como referência a capacidade de pote, e os volumes percolados foram coletados e medidos em proveta volumétrica graduada de 1000mL, para se estimar a pegada hídrica das cultivares. A cada rega eram estimados os volumes retidos no substrato pela diferença entre os volumes aplicados e os percolados equivalentes. Ao final do experimento, foi feito somatório dos volumes retidos no substrato, estimando-se o consumo de água durante todo o processo produtivo do feijão-caupi, no período de condução do experimento, para cada cultivar. A partir dos dados obtidos de produtividade e de volume de água utilizado em cada tratamento, calculou-se o componente azul da pegada hídrica ($WF_{proc, blue}$, $m^3 \text{ ton}^{-1}$) no processo produtivo das cultivares de feijão-caupi avaliadas. Este foi calculado como o componente azul no uso da água pela cultura (CWU_{blue} , $m^3 \text{ ha}^{-1}$) dividido pelo rendimento da colheita (Y , ton. ha^{-1}). Assim, utilizou-se a seguinte equação (Hoekstra et al., 2011):

$$WF_{proc, blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \quad [m^3 \cdot \text{ton}^{-1}] \quad (9)$$

4.4. Análise Estatística

O experimento foi feito em esquema fatorial para estudo dos efeitos das interações entre cultivares e turnos de rega. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e, quando detectados efeitos significativos pelo teste F, a 5% de probabilidade, os efeitos das cultivares foram comparados pelo teste de Tukey e os efeitos dos turnos de rega foram ajustados por equações de regressão. Testou-se a significância dos modelos linear e quadrático, tendo sido escolhida a equação significativa com maior grau. As análises estatísticas foram realizadas com o programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2011).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Avaliações Morfológicas

Ocorreu efeito significativo das cultivares (C) sobre as características comprimento da haste principal (CHP) e número total de folhas (NMF) (Tabela 3). Houve também efeito significativo dos turnos de rega (TR) sobre CHP, comprimento da nervura central da folha D (CND), NMF, diâmetro da haste principal (DHP), área foliar total (AFT), área foliar da folha D (AFD), massa fresca da parte aérea (MFA) e massa seca da parte aérea (MSA). A interação C x TR foi significativa na característica CHP.

A cultivar BRS Rouxinol apresentou as maiores médias para CHP (228,2 e 157,5 cm) nos turnos de 2 e 4 dias, com a haste principal 66,2 e 86,2 cm mais alta que a média das demais cultivares nestes dois turnos, respectivamente. Não houve diferença significativa entre as cultivares para CHP nos turnos de rega de 6 e 8 dias, com alturas médias de 68,8 e 40,6 cm, respectivamente (Tabela 3).

Para a variável altura de planta (CHP), o modelo linear de primeiro grau foi o que melhor se ajustou para 'BRS Rouxinol' em relação aos efeitos dos turnos de rega, diminuindo a altura das plantas em aproximadamente 33,3 cm a cada aumento de um dia no turno de rega, e redução de aproximadamente 83% na altura das plantas entre os turnos de 2 e 8 dias. Para 'BRS Pajeú' e 'BRS Marataoã' foi observado efeito quadrático para o ajuste da regressão, com estimativa de redução nas alturas de 72% e 75% entre os turnos de 2 e 8 dias, respectivamente, sendo que a redução da CHP foi mais acentuada no intervalo entre 2, 4 e 6 dias e menor quando se compara 6 e 8 dias (Figura 5A).

Tabela 3. Médias para o comprimento da haste principal (CHP), número total de folhas planta⁻¹ (NMF), comprimento do sistema radicular (CRZ), comprimento da nervura central de folíolos da folha D (CND), diâmetro da haste principal (DHP), área foliar total (AFT), área foliar da folha D (AFD), massa fresca da parte aérea (MFA) e massa seca da parte aérea (MSA)

CULTIVAR	CHP (cm)	NMF	CRZ (cm)	CND (cm)	DHP (mm)	AFT (cm ²)	AFD (cm ²)	MFA (g)	MSA (g)
Turno de Rega de 2 dias									
C1	156,0 b	9,75 b	58,70 a	12,85 a	6,15 a	1354,06 a	207,92 a	75,16 a	9,69 a
C2	168,0 b	11,50ab	53,50 a	13,65 a	6,56 a	1591,00 a	211,56 a	87,68 a	11,24 a
C3	228,2 a	14,00 a	75,25 a	12,58 a	6,58 a	2107,85 a	189,18 a	108,80 a	14,57 a
Turno de Rega de 4 dias									
C1	54,2 b	5,50 b	53,75 a	14,83 a	6,06 a	938,23 a	203,02 a	52,60 a	6,47 a
C2	88,5 b	6,00 ab	51,75 a	13,90 a	6,15 a	923,69 a	212,88 a	50,52 a	6,23 a
C3	157,5 a	8,75 a	56,75 a	13,30 a	5,91 a	1364,69 a	243,36 a	65,84 a	8,70 a
Turno de Rega de 6 dias									
C1	90,0 a	5,75 a	45,75 a	12,40 a	4,59 a	941,11 a	169,50 a	44,60 a	5,50 a
C2	54,5 a	5,50 a	56,75 a	12,08 a	5,36 a	563,83 a	157,13 a	31,98 a	4,00 a
C3	62,0 a	5,50 a	53,75 a	11,65 a	4,92 a	702,29 a	142,48 a	37,29 a	4,76 a
Turno de Rega de 8 dias									
C1	42,2 a	4,25 a	47,75 a	12,33 a	4,58 a	553,63 a	165,47 a	30,55 a	3,78 a
C2	41,5 a	5,50 a	58,75 a	12,33 a	5,43 a	790,09 a	182,65 a	40,08 a	4,94 a
C3	38,2 a	4,50 a	43,15 a	11,75 a	4,69 a	528,08 a	126,75 a	27,15 a	3,53 a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna e dentro do mesmo turno de rega não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey. C1 = 'BRS Pajeú', C2 = 'BRS Marataoá', C3 = 'BRS Rouxinol'.

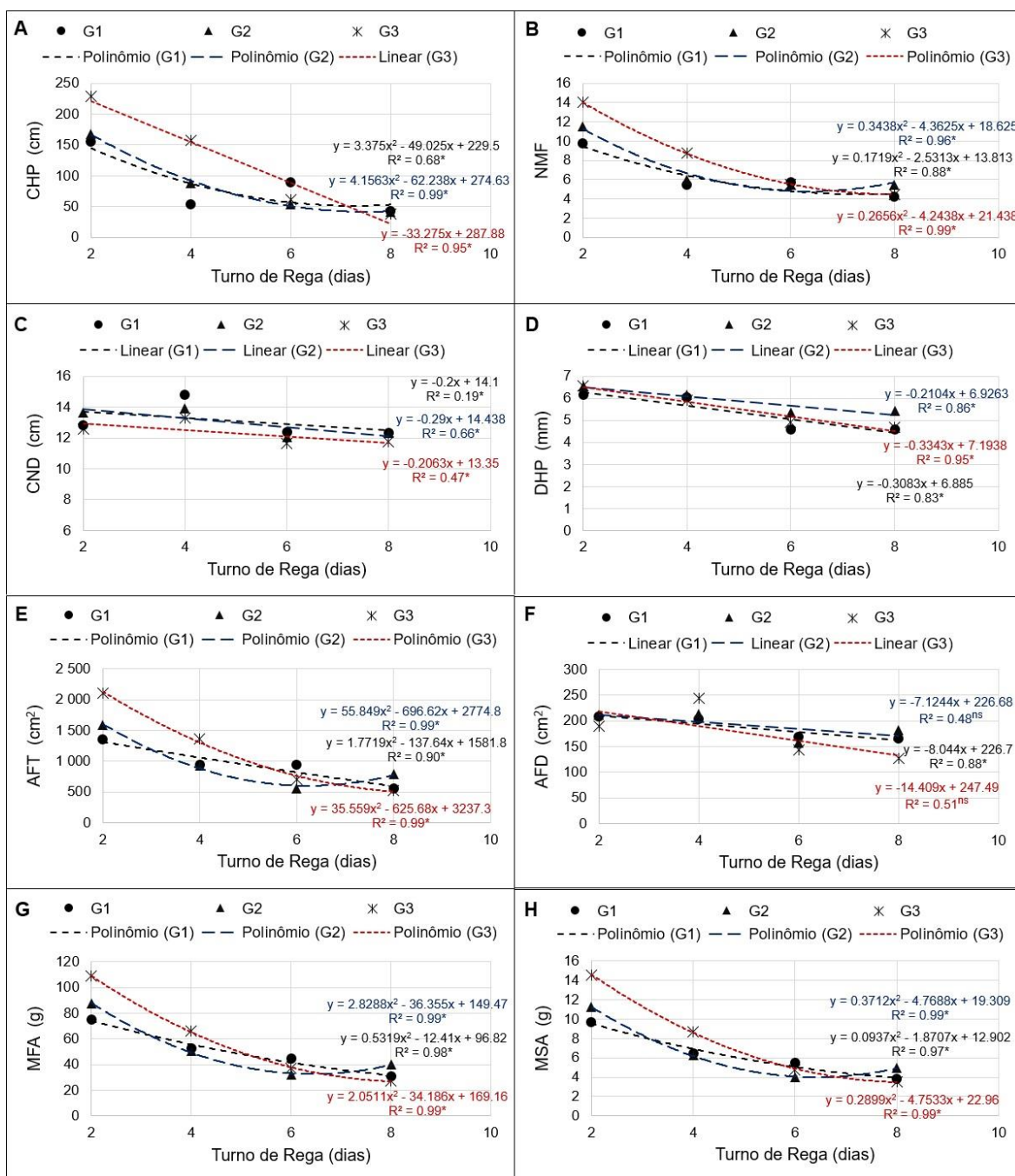


Figura 5. Comprimento da haste principal (CHP) (A), número total de folhas planta⁻¹ (NMF) (B), comprimento da nervura central de folíolos da folha D (CND) (C), diâmetro da haste principal (DHP) (D), área foliar total (AFT) (E), área foliar da folha D (AFD) (F), massa fresca da parte aérea (MFA) (G) e massa seca da parte aérea (MSA) (H) das cultivares BRS Pajeú (G1), BRS Marataoã (G2) e BRS Rouxinol (G3) em função dos intervalos de rega de 2, 4, 6 e 8 dias.

Machado et al. (2008), avaliando diferentes linhagens nacionais e internacionais de feijão-caupi em cultivo irrigado, relataram valores de comprimento da haste principal oscilando entre 24,2 a 58,8 cm.

Locatelli et al. (2016) avaliaram o efeito de lâminas de irrigação de 30%, 60%, 90% e 120% de ETo sobre três cultivares de caupi, e encontraram médias gerais para CHP de 55,3 cm; 52,6 cm e 50,4 cm. Meira et al (2016) observaram valores oscilando entre 31,9 a 57,8 cm para o comprimento do ramo principal. Entretanto, Silva et al. (2021), avaliando o efeito da suspensão de irrigação por nove dias, observaram variação na altura de plantas de 50 a 120 cm de três cultivares de caupi no período de pré-floração. Os autores ao retomarem a irrigação por quatro dias, observaram aumento nas médias desta variável com valores de altura variando de 90 a 170 cm.

Nascimento et al. (2004) relataram o crescimento de cultivares de caupi submetidas a níveis de disponibilidade hídrica, entre os 22 e os 43 DAS, e observaram que até os 36 DAS, as plantas apresentaram o mesmo crescimento, porém, a partir dos 36 DAS, verificaram diferenças entre os tratamentos para esta variável. Segundo os autores, a exigência por água no feijão-caupi aumenta na fase reprodutiva, reduzindo a altura de plantas, e sendo mais tolerante ao déficit hídrico na fase vegetativa.

Condições que reduzem a permeabilidade do sistema radicular, como estresse salino e déficit hídrico, reduzem a taxa fotossintética e de crescimento vegetal (Gomes Filho et al., 2019), a turgescência, a expansão celular, o alongamento do caule e das folhas (Resende et al., 1981). O déficit hídrico compromete a translocação de fotoassimilados para as raízes afetando diretamente o crescimento da planta, segundo Osakabe et al. (2014) e Taiz et al. (2017). Entretanto, Melo et al. (2022) verificaram que a cultivar Marataoã apresentou células do córtex bem desenvolvidas e feixes vasculares mais organizados em condições de estresse hídrico em comparação às cultivares BRS Tracuateua, BRS Tumucumaque e Pingo de ouro 1-2.

O crescimento excessivo em altura (estiolamento) das cultivares nos turnos de rega de 2 e 4 dias pode estar associado ao sombreamento no interior da casa de vegetação, considerando a necessidade da espécie *Vigna unguiculata* de muitas horas de luz solar direta para seu pleno desenvolvimento, e a alta disponibilidade hídrica. De acordo com Phogat et al. (1984), o feijão-caupi

apresenta alta interceptação de energia luminosa em razão às folhas glabras de coloração verde escura. Os autores observaram reflexão de apenas 4,3 % da energia luminosa pelas folhas de feijão-caupi ao avaliarem a taxa de fotossíntese líquida e a absorção da radiação fotossinteticamente ativa por esta cultura em ótimas condições de água no solo.

A 'BRS Rouxinol' apresentou 4,3 e 3 folhas mais que Pajeú para o NMF nos turnos de 2 e 4 dias, respectivamente. A cultivar BRS Marataoã não diferiu estatisticamente das cultivares BRS Pajeú e BRS Rouxinol para esta característica nos turnos de rega de 2 e 4 dias. Todas as cultivares apresentaram NMF semelhantes nos turnos de rega de 6 e 8 dias, com médias gerais de 5,6 e 4,8 folhas, respectivamente (Tabela 3).

As três cultivares apresentaram ajuste quadrático com respostas decrescentes para número de folhas planta⁻¹ (NMF) à medida que os turnos de rega aumentavam. Houve redução em NMF de aproximadamente 2,3, 2,1 e 1,8 para 'BRS Rouxinol', 'BRS Marataoã' e 'BRS Pajeú', respectivamente, a cada dia de turno de rega aumentado.

Comparando os turnos de rega de 2 e 8 dias, a cultivar BRS Rouxinol, que apresentou o maior NMF no turno de 2 dias, apresentou a maior redução na média do NMF (aproximadamente 67,8%, cerca de 9,5 folhas), 'BRS Marataoã' e 'BRS Pajeú' tiveram redução média de 6 folhas (56%) e 5,5 folhas (52%), respectivamente (Figura 5B). Desta forma, a ampliação do período de estresse determina maiores perdas no número de folhas nas cultivares que apresentaram maiores valores para essa variável em condições normais de disponibilidade hídrica. Maia et al. (2013) encontraram reduções na mesma proporção em cultivares de caupi submetidas a déficit hídrico.

Nascimento et al. (2004), avaliando o efeito dos níveis de água disponível no solo sobre cultivares de caupi, relataram reduções de 11; 23 e 35% no número de folhas por planta, respectivamente, para os níveis de 80; 60 e 40% de água disponível, quando comparados à testemunha. Silva et al. (2021) observaram aumento nas médias para diâmetro do caule e número de folhas em plantas de caupi reidratadas após 9 dias de estresse hídrico. Martins et al. (2017) encontraram decréscimo de aproximadamente 10, 20 e 33% no número de folhas em plantas de feijoeiro comum submetidas a níveis de 20, 40 e 60% de déficit

hídrico no solo, respectivamente, quando comparado com as plantas não submetidas ao déficit hídrico.

O comprimento da nervura central de folíolos da folha D (CND) apresentou ajuste linear para as três cultivares avaliadas nos intervalos de turno de rega. Houve redução de 1,3, 0,8 e 0,5 cm em CND das 'BRS Marataoã', 'BRS Rouxinol' e 'BRS Pajeú', respectivamente, comparando os turnos de 2 e 8 dias. Cada aumento de um dia no turno de rega resultou em redução no CND em 3,3, 3,2 e 3,0 cm para 'BRS Marataoã', 'BRS Pajeú' e 'BRS Rouxinol', respectivamente (Figura 5C).

Houve diferença significativa para o diâmetro da haste principal (DHP) com ajuste linear decrescente entre os turnos de rega para as três cultivares avaliadas. As médias para essa característica reduziram 1,9, 1,6 e 1,1 mm entre os turnos de 2 e 8 dias para 'BRS Rouxinol', 'BRS Pajeú' e 'BRS Marataoã', respectivamente. A cada dia de turno de rega aumentado, houve redução em DHP de 1,3, 1,4 e 1,5 mm, aproximadamente, para 'BRS Pajeú', 'BRS Rouxinol' e 'BRS Marataoã', respectivamente (Figura 5D).

A cultivar BRS Pajeú apresentou ajuste linear para a variável área foliar total (AFT) nos intervalos de turno de rega aplicados. Estimou-se redução de 59% na área foliar total entre os turnos de 2 e 8 dias para esta cultivar, e aproximadamente, perda de 238,5 cm² a cada dia de turno acrescido. Para 'BRS Marataoã' e 'BRS Rouxinol' houve ajuste quadrático para os efeitos dos turnos de rega. Para as duas cultivares houve redução de 64 e 75% entre as médias dos turnos de 2 e 8 dias, respectivamente, com perda aproximada de 297,6 e 329,5 cm² a cada dia de turno acrescido, respectivamente. Entretanto, a cultivar BRS Marataoã apresentou ganho de 226,3 mm² entre os turnos de 6 e 8 dias (Figura 5E).

Estes resultados assemelham-se aos obtidos por Oliveira et al. (2012), Bastos et al. (2012) e Locatelli et al. (2016), que avaliaram o crescimento do feijão-caupi sob diferentes lâminas de irrigação e verificaram redução considerável da área foliar da cultura à medida que o estresse hídrico foi intensificado. Martins et al. (2017) verificaram decréscimos de aproximadamente 11, 22 e 32% para a AFT de plantas de feijão comum submetidas a níveis de 20, 40 e 60% de déficit hídrico no solo, respectivamente, em relação a plantas não submetidas ao déficit hídrico.

As três cultivares avaliadas apresentaram diferença significativa para a variável área foliar da folha D (AFD) com ajuste linear para os efeitos dos turnos de rega, reduzindo a área foliar da folha diagnóstica à medida que os intervalos dos turnos de rega foram aumentados. Foi estimada perda de 49,3, 46,7 e 39,5 cm² a cada acréscimo em dia nos turnos para 'BRS Marataoã', 'BRS Pajeú' e 'BRS Rouxinol', respectivamente. Houve redução de 62,4, 42,5 e 28,9 cm² entre as médias dos turnos de 2 e 8 dias para 'BRS Rouxinol', 'BRS Pajeú' e 'BRS Marataoã', respectivamente (Figura 5F).

Bastos et al. (2012) relataram que plantas de caupi sob estresse hídrico, para evitar a dessecação, reduzem a superfície de transpiração pelo enrolamento dos folíolos, sendo esta uma medida reversível pela reidratação das plantas. Isto é uma forma de tolerância ao déficit hídrico. No presente trabalho, foi possível observar algo semelhante nas três cultivares nos turnos de 6 e 8 dias. Segundo Olsovska et al. (2016), ocorre redução no tamanho dos estômatos em ambientes com menor disponibilidade de água, para que haja o mínimo de perda de água para a atmosfera, além do aumento na densidade daqueles para contribuir com o equilíbrio das trocas gasosas. Estas alterações morfológicas em plantas submetidas ao estresse hídrico podem compensar a redução de área foliar e de potencial hídrico (Catuchi et al., 2012).

O déficit hídrico causa aumento na concentração de solutos no citosol e perda progressiva de turgescência celular, causando danos em organelas e distúrbios funcionais celulares (Bastos et al., 2012). Porém, teores elevados de água no solo podem resultar em desenvolvimento vegetativo excessivo do feijão-caupi e índices de área foliar extremamente altos, com conseqüente redução na disponibilidade de luz pelo sombreamento das folhas superiores sobre as folhas inferiores do dossel, o que reduz a eficiência fotossintética e produtividade de grãos (Freire Filho et al., 2005b).

Para a variável massa fresca da parte aérea (MFA), as três cultivares apresentaram ajuste quadrático para os efeitos dos tratamentos. As médias variaram de 108,8 a 27,2 g para Rouxinol, de 87,7 a 40,1 g para Marataoã e de 75,2 a 30,6 g para Pajeú, entre os turnos de 2 e 8 dias. A MFA foi reduzida à medida que os intervalos dos turnos de rega foram aumentados, entretanto, houve pequeno aumento entre os turnos de 6 e 8 dias para a cultivar BRS Marataoã. Houve redução de 81,7 e 44,6 g entre as médias dos turnos de 2 e 8

dias, com perda de 17,0 e 13,2 g a cada acréscimo em dia nos turnos para 'BRS Rouxinol' e 'BRS Pajeú', respectivamente. A cultivar BRS Marataoã apresentou redução de 47,6 g entre as médias dos turnos de 2 e 8 dias, com perda de 16,0 g a cada dia acrescido aos turnos. Houve ganho de 8,1 g entre os turnos de 6 e 8 dias para esta cultivar (Figura 5G).

Todas as cultivares tiveram ajuste quadrático para a variável massa seca da parte aérea (MSA) sob os efeitos dos turnos de rega. As médias variaram de 14,6 a 3,5 g para Rouxinol, de 11,2 a 4,9 g para Marataoã e de 9,7 a 3,8 g para Pajeú, entre os turnos de 2 e 8 dias. Houve redução de 5,9 e 11,0 g entre as médias dos turnos de 2 e 8 dias, com perda de 1,7 e 2,3 g a cada acréscimo de um dia nos turnos para 'BRS Pajeú' e 'BRS Rouxinol', respectivamente. A cultivar BRS Marataoã apresentou redução de 6,3 g entre as médias dos turnos de 2 e 8 dias, com perda de 2 g a cada dia acrescido aos turnos. Houve ganho de 0,94 g entre os turnos de 6 e 8 dias para esta cultivar (Figura 5H).

Locatelli et al. (2016), estudando a influência de diferentes lâminas de irrigação sobre cultivares de caupi, observaram médias de massa seca da parte aérea variando de 30 a 23 g para a maior lâmina de irrigação (356mm) e de 22 a 19 g para a menor lâmina (107 mm). Estes valores não corroboram com os do presente estudo, possivelmente por ter sido um experimento implantado em campo, além das diferenças ambientais de cada localidade. Além disto, as plantas do presente trabalho não produziram ramos laterais, levando a menores valores de AFT, MFA e MSA pelo menor número de folhas, mesmo no turno de 2 dias.

Martins et al. (2017), avaliando o efeito de porcentagens de déficit hídrico no solo sobre o feijoeiro comum, observaram reduções de 15, 30 e 45% para a MSA das plantas submetidas aos níveis de 20, 40 e 60% de déficit hídrico no solo, respectivamente, em relação às plantas com irrigação plena.

5.2. Avaliações Fisiológicas

Ocorreu efeito significativo dos turnos de rega sobre as variáveis índice de desempenho fotoquímico na pré-irrigação ($Plabs_a$), índice de desempenho fotoquímico na pós-irrigação ($Plabs_p$) e pressão aplicada na antemanhã (PA_{am}) (Figura 6). Houve também efeito significativo das cultivares sobre as variáveis

rendimento quântico máximo do fotossistema II na pós-irrigação (F_v/F_{m_p}) e índice de desempenho fotoquímico na pós-irrigação ($Plabs_p$) (Tabela 4).

Todas as cultivares, para o índice de desempenho fotoquímico na pré-irrigação ($Plabs_a$), ajustaram-se linearmente para os efeitos de turno de rega, apresentando redução no desempenho fotoquímico à medida que os intervalos de turnos de rega aumentavam (Figura 6B).

Houve redução em $Plabs_a$ entre as médias dos turnos de 2 e 8 dias de aproximadamente 3,56 e 3,70 para 'BRS Pajeú' e 'BRS Marataoã', respectivamente. 'BRS Rouxinol' apresentou redução de, aproximadamente, 2,05 para essa característica entre os turnos de 2 e 6 dias, e aumento de 0,10 entre os turnos de 6 e 8 dias. Estimou-se a cada aumento de um dia no turno de rega, redução em $Plabs_a$ de aproximadamente 1,03, 1,37 e 1,04 para 'BRS Pajeú', 'BRS Marataoã' e 'BRS Rouxinol', respectivamente. O mesmo foi observado em $Plabs_p$ para as 3 cultivares, porém com ajuste quadrático (Figura 6C).

Maiores médias de $Plabs_a$ foram verificadas em 'BRS Marataoã' quando comparadas com as médias de 'BRS Pajeú' e 'BRS Rouxinol', também na pré-irrigação (3,64 a 7,34; 2,36 a 5,92; e 3,07 a 5,12, respectivamente).

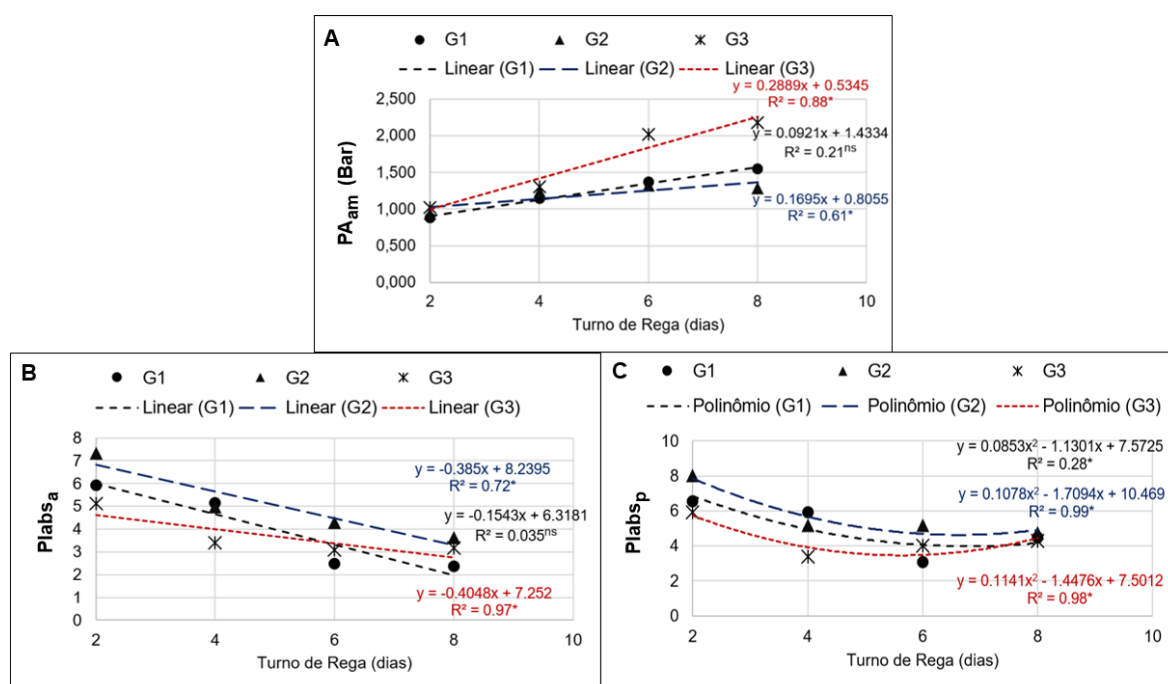


Figura 6. Gráficos de regressão das variáveis índice de desempenho fotoquímico na pré-irrigação ($Plabs_a$) (A) e índice de desempenho fotoquímico na pós-irrigação ($Plabs_p$) (B) das cultivares BRS Pajeú (G1), BRS Marataoã (G2) e BRS Rouxinol (G3) em função dos intervalos de rega de 2, 4, 6 e 8 dias.

Tabela 4. Médias para o teor de clorofila total na pré (SPAD_a) e pós-irrigação (SPAD_p), pressão aplicada na antemanhã (PA_{am}), pressão aplicada ao meio-dia (PA_{md}), rendimento quântico máximo do fotossistema II na pré (Fv/Fm_a) e pós-irrigação (Fv/Fm_p), índice de desempenho fotoquímico na pré (Plabs_a) e pós-irrigação (Plabs_p), condutância estomática na pré (CE_a) e na pós-irrigação (CE_p)

CULTIVAR	SPAD _a	SPAD _p	PA _{am} (Bar)	PA _{md} (Bar)	Fv/Fm _a	Fv/Fm _p	Plabs _a	Plabs _p	CE _a ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	CE _p ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Turno de Rega de 2 dias										
C1	51,53 a	50,98 a	0,88 a	1,37 a	0,76 a	0,76 b	5,92 a	6,52 ab	34,90 a	74,13 a
C2	55,23 a	52,30 a	0,94 a	1,41 a	0,77 a	0,79 a	7,34 a	8,01 a	33,85 a	145,50 a
C3	52,40 a	51,98 a	1,02 a	1,30 a	0,73 a	0,77 ab	5,12 a	5,91 b	33,88 a	107,13 a
Turno de Rega de 4 dias										
C1	54,60 a	55,85 a	1,15 a	1,85 a	0,77 a	0,77 ab	5,15 a	5,92 a	30,88 a	103,00 a
C2	48,08 a	49,15 a	1,24 a	1,76 a	0,78 a	0,78 a	4,98 a	5,18 ab	29,03 a	165,28 a
C3	46,65 a	47,58 a	1,31 a	1,78 a	0,74 a	0,76 b	3,38 a	3,96 b	29,43 a	104,25 a
Turno de Rega de 6 dias										
C1	43,53 a	42,73 a	1,37 a	1,98 a	0,73 a	0,74 a	2,47 a	3,08 b	31,88 a	73,78 a
C2	49,93 a	50,98 a	1,32 a	2,18 a	0,75 a	0,75 a	4,27 a	5,17 a	24,23 a	139,98 a
C3	49,45 a	49,20 a	2,02 a	2,23 a	0,73 a	0,75 a	3,07 a	4,01 ab	28,58 a	88,95 a
Turno de Rega de 8 dias										
C1	51,75 a	50,13 a	1,55 a	2,30 a	0,76 a	0,76 ab	2,36 a	4,49 a	42,00 a	143,28 a
C2	48,20 a	47,78 a	1,29 a	1,92 a	0,73 a	0,77 a	3,64 a	4,74 a	26,25 a	103,70 a
C3	48,53 a	48,48 a	2,18 a	2,41 a	0,74 a	0,74 b	3,17 a	3,87 b	31,10 a	71,95 a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna e dentro do mesmo turno de rega não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey. C1 = 'BRS Pajeú', C2 = 'BRS Marataoá', C3 = 'BRS Rouxinol'.

A cultivar BRS Marataoã apresentou médias de $Plabs_p$ aproximadamente 1,79, 1,62 e 0,56 mais altas que a média das demais cultivares nos turnos de rega de 2, 6 e 8 dias, respectivamente. A cultivar BRS Pajeú apresentou média de $Plabs_p$ 1,35 mais alta que a média das demais cultivares no turno de rega de 4 dias. Entretanto, as médias destas duas cultivares não diferiram estatisticamente nos turnos de 2, 4 e 8 dias (Tabela 4).

Houve redução em $Plabs_p$ entre as médias dos turnos de 2 e 8 dias de aproximadamente 3,27 e 2,04 para 'BRS Marataoã' e 'BRS Rouxinol'. 'BRS Pajeú' apresentou redução de, aproximadamente, 3,44 para essa característica entre os turnos de 2 e 6 dias, e aumento de 1,41 entre os turnos de 6 e 8 dias. Estimou-se a cada aumento de um dia no turno de rega, redução em $Plabs_p$ de aproximadamente 1,37, 1,59 e 1,22 para 'BRS Pajeú', 'BRS Marataoã' e 'BRS Rouxinol', respectivamente.

Comparando-se $Plabs_a$ e $Plabs_p$, observa-se aumento nas médias entre estas duas variáveis, para as três cultivares em todos os turnos de rega (Tabela 4). Na pós-irrigação, os valores de $Plabs_p$ aumentaram em relação à pré-irrigação ($Plabs_a$) nas três cultivares, com 'BRS Marataoã' apresentando as maiores médias em relação às demais cultivares (Tabela 4).

Analisando as médias do índice de desempenho ($Plabs$) e da eficiência máxima do fotossistema II (Fv/Fm), para as três cultivares avaliadas, verificaram-se padrões similares de resposta em função dos turnos de rega.

Os valores médios de Fv/Fm variaram de 0,73 a 0,76 na pré-irrigação e 0,74 a 0,76 na pós-irrigação para 'BRS Pajeú'; de 0,73 a 0,78 na pré-irrigação e 0,75 a 0,79 na pós-irrigação para 'BRS Marataoã'; e de 0,73 a 0,74 na pré-irrigação e 0,74 a 0,77 na pós-irrigação para 'BRS Rouxinol' (Tabela 4).

Para Fv/Fm_p , a cultivar BRS Marataoã apresentou média aproximadamente 0,03 mais alta que BRS Pajeú no turno de rega de 2 dias e 0,02 e 0,03 mais altas que a média de BRS Rouxinol nos turnos de rega de 4 e 8 dias, respectivamente. Não houve diferença significativa entre as cultivares no turno de rega de 6 dias para esta característica (Tabela 4).

De acordo com Araújo (2009) e Bolhár-Nordenkampf et al. (1989), plantas não estressadas apresentam valores de Fv/Fm na faixa de 0,75 a 0,85. Comparando as médias de Fv/Fm_a e Fv/Fm_p , observa-se que a cultivar BRS Marataoã se mostrou estressada apenas no turno de 8 dias (0,73), mas após a

irrigação a cultivar conseguiu se recuperar (0,77). 'BRS Pajeú' se mostrou estressada na pré-irrigação no turno de 6 dias e 'BRS Rouxinol' em todos os turnos, mas permaneceram estressadas após a irrigação nos turnos de 6 e 8 dias, respectivamente.

A redução na relação F_v/F_m como nos valores de Plabs indica efeito de fotoinibição em plantas submetidas a condições de estresse, representando perda de eficiência e desempenho fotoquímico, podendo ser uma resposta reversível à regulação de fotoproteção ou inativação não reversível do fotossistema II (PSII) (Araújo, 2009).

O índice de desempenho fotoquímico (Plabs) combina respostas parciais de componentes do aparato fotossintético para determinar a atividade potencial do aparelho fotoquímico (Zamperlini, 2010), ou seja, o fluxo energético na cadeia transportadora de elétrons do fotossistema (Farias, 2014). O Plabs tem sido considerado como uma medida mais sensível na detecção de estresse em plantas (Sampaio, 2012), que a eficiência máxima do fotossistema II (F_v/F_m) (Gonçalves et al., 2010).

Silva et al. (2021) ao estudarem efeitos de estresse hídrico e reidratação em cultivares de feijão-caupi, também observaram redução nos valores F_v/F_m no período de 9 dias de aplicação de déficit hídrico, e ao fazer reidratação por 4 dias, registraram recuperação do rendimento quântico do PSII pelo aumento nos valores de F_v/F_m ao final do período de reidratação. Isto explica o leve aumento nos valores de F_v/F_m para as três cultivares avaliadas e as médias abaixo de 0,75 em 'BRS Pajeú' e 'BRS Rouxinol' na pós-irrigação dos turnos de 6 e 8 dias, respectivamente.

Os turnos de rega foram aplicados por 38 dias e mesmo com as regas ao final de cada turno, as plantas de feijão-caupi, possivelmente, não conseguiram se recuperar com apenas uma rega entre um turno e outro. No entanto, estes resultados estão em desacordo com Pereira (2019), que observou valores para F_v/F_m abaixo de 0,40 em duas cultivares de caupi com apenas 4 dias de estresse hídrico, porém após reidratação a autora observou aumento em F_v/F_m acima de 0,6, mostrando a capacidade do feijão-caupi de se recuperar dos efeitos de estresse hídrico quando reidratado.

Para a variável pressão aplicada na antemanhã (PA_{am}), as três cultivares apresentaram ajuste linear para os efeitos dos turnos de rega. Assim, nota-se que

as médias de Ψ_{am} apresentaram elevação com o aumento dos intervalos de turno de rega, indicando que o potencial hídrico das cultivares decresceu com o aumento dos mesmos (Figura 6A). A pressão aplicada sobre as folhas na câmara de pressão de Scholander é uma função do potencial hídrico foliar (Ψ_f). O Ψ_f é a variável mais utilizada em estudos fisiológicos para avaliar a deficiência hídrica das plantas (Angelocci, 2002), mensurando o estado hídrico do vegetal (Bastos et al., 2012).

As médias do potencial hídrico foliar na antemanhã (Ψ_{am}) entre os turnos de 2, 4, 6 e 8 dias variaram de -0,88 a -1,55, -0,94 a -1,29, e -1,02 a -2,18 para 'BRS Pajeú', 'BRS Marataoã' e 'BRS Rouxinol', respectivamente (Figura 7A). As médias do potencial hídrico foliar ao meio-dia (Ψ_{md}) entre os turnos de 2, 4, 6 e 8 dias variaram de -1,37 a -2,30, -1,41 a -1,92, e -1,30 a -2,41 para 'BRS Pajeú', 'BRS Marataoã' e 'BRS Rouxinol', respectivamente (Figura 7B).

Houve redução em Ψ_{am} entre as médias dos turnos de 2 e 8 dias de aproximadamente 0,67, 0,35 e 1,16 MPa para 'BRS Pajeú', 'BRS Marataoã' e 'BRS Rouxinol', respectivamente. A cada aumento de um dia no turno de rega, estimou-se redução em Ψ_{am} de aproximadamente 0,30, 0,28 e 0,40 MPa para 'BRS Pajeú', 'BRS Marataoã' e 'BRS Rouxinol', respectivamente.

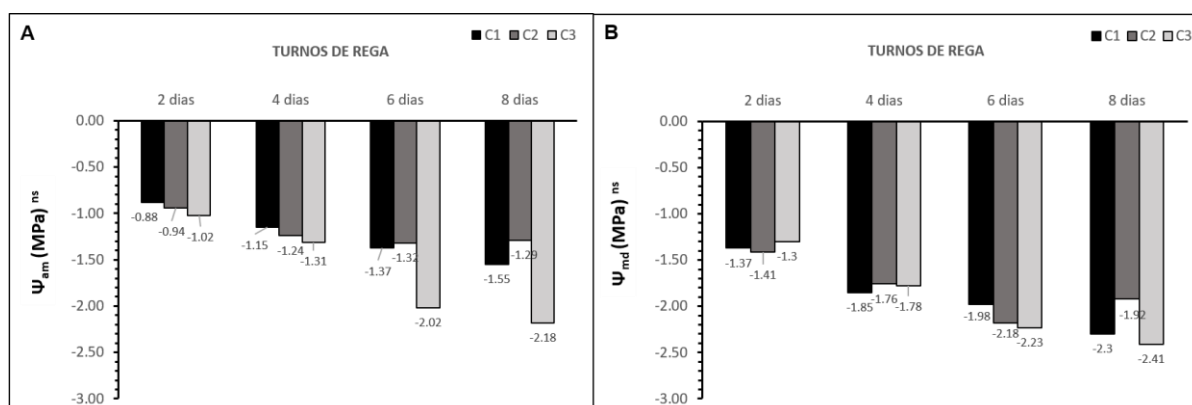


Figura 7. Potencial hídrico foliar na antemanhã (Ψ_{am}) (A) e ao meio-dia (Ψ_{md}) (B) das cultivares BRS Pajeú (C1), BRS Marataoã (C2) e BRS Rouxinol (C3), nos turnos de 2, 4, 6 e 8 dias. ns = médias não diferem estatisticamente entre si dentro do turno de rega.

Houve redução em Ψ_{md} entre as médias dos turnos de 2 e 8 dias de aproximadamente 0,93, 0,51 e 1,11 MPa para 'BRS Pajeú', 'BRS Marataoã' e 'BRS Rouxinol', respectivamente. A cada aumento de um dia no turno de rega, estimou-se redução no Ψ_f ao meio-dia de aproximadamente 0,46, 0,42 e 0,46 MPa para 'BRS Pajeú', 'BRS Marataoã' e 'BRS Rouxinol', respectivamente. Comparando-se as médias de pressão aplicada na antemanhã (PA_{am}) e pressão aplicada ao meio-dia (PA_{md}), observa-se aumento entre os valores obtidos na antemanhã e ao meio-dia para as três cultivares em todos os turnos de rega (Tabela 4).

Taiz et al. (2017) afirmam que plantas herbáceas bem hidratadas apresentam potenciais hídricos foliares (Ψ_f) variando de $-0,2$ a $-1,0$ MPa, e deficiência hídrica moderada entre $-1,0$ e $-2,0$. Segundo Boyer (1978), potenciais hídricos foliares inferiores a $-2,5$ MPa são letais para o feijão-caupi.

Observa-se que mesmo na antemanhã a cultivar BRS Rouxinol já apresentava deficiência hídrica severa nos turnos de 6 e 8 dias, com potenciais hídricos de $-2,02$ e $-2,18$ MPa, respectivamente, e $-2,23$ e $-2,41$ MPa ao meio-dia, respectivamente. Entretanto, comparando os potenciais hídricos da antemanhã e ao meio-dia, houve pequena variação de $-0,21$ e $-0,23$ MPa, respectivamente, indicando a capacidade desta cultivar de manter o conteúdo de água na planta em períodos mais quentes do dia (Tabela 4, Figura 7).

As cultivares BRS Pajeú e BRS Marataoã apresentaram deficiência hídrica leve a partir do turno de rega de 4 dias na antemanhã. Porém, nas avaliações ao meio-dia, houve aumento na deficiência hídrica, variando de moderada (turnos de 2 e 4 dias) a severa (6 e 8 dias) para ambas as cultivares (Tabela 4, Figura 7).

Nascimento (2011) avaliando cultivares de feijão-caupi sob déficit hídrico encontrou valores de Ψ_f mínimo e máximo de $-1,22$ e $-2,05$ MPa. Pimentel e Hébert (1999) avaliando duas cultivares de caupi sob estresse hídrico e reidratadas, encontraram valores máximos de Ψ_f de $-2,0$ e $-2,3$ MPa no 8º dia de estresse e valores próximos a $-0,5$ MPa após a reidratação.

Não ocorreram efeitos significativos das cultivares e dos turnos de rega sobre o teor de clorofila total nas avaliações de pré-rega ($SPAD_a$), pós-rega ($SPAD_p$), pressão aplicada ao meio-dia (PA_{md}), rendimento quântico máximo do fotossistema II na pré-rega (F_v/F_{m_a}), condutância estomática na pré-rega (CE_a) e pós-rega (CE_p). Entretanto, comparando-se as médias de condutância estomática

na pré-rega (CE_a) e pós-rega (CE_p), foi observado aumento entre estas duas variáveis para as três cultivares em todos os turnos de rega, indicando a capacidade transpiratória das três cultivares, mesmo após período prolongado de estresse hídrico (Tabela 4).

Não houve diferença significativa entre cultivares para as variáveis pressão aplicada na antemanhã (PA_{am}) e índice de desempenho fotoquímico na pré-rega ($Plabs_a$), como mostra a Tabela 4.

Segundo Bastos et al. (2012), a alteração nos processos fotossintéticos é um fator limitante na produtividade agrícola. Os autores observaram que o aumento ou a redução nas variáveis morfofisiológicas: teor de clorofila, índice de área foliar e potencial de água da folha, provoca aumento ou redução na produtividade de grãos, indicando uma correlação positiva e significativa entre estas características.

5.3. Componentes de produtividade e Pegada hídrica azul

A cultivar BRS Marataoã apresentou maior média de número total de grãos por planta (NTG) no turno de 2 dias, com 6,9 grãos a mais que as demais cultivares. Entretanto, nos turnos de 4, 6 e 8 dias, a cultivar BRS Pajeú apresentou valores de média de NTG superiores. As médias de 'BRS Pajeú' para esta característica foram aproximadamente 22,9, 21,3 e 20,7 mais altas que as médias das demais cultivares nos turnos 4, 6 e 8 dias, respectivamente (Tabela 5).

Para a massa total de grãos por planta (MTG), a cultivar BRS Pajeú apresentou as maiores médias em todos os turnos de rega, com aproximadamente, 0,60, 3,91, 3,35 e 4,65g a mais que as demais cultivares nos turnos de 2, 4, 6 e 8 dias, respectivamente. Estimando-se a produtividade desta cultivar em $kg\ ha^{-1}$ com densidade de plantio de cem mil plantas por hectare, como sugerido por Freire Filho et al. (2009), tem-se 1013, 1335, 1291, 1331 $kg\ ha^{-1}$, nos turnos de 2, 4, 6 e 8 dias, respectivamente (Tabela 5). A média geral de produtividade para Pajeú, Marataoã e Rouxinol foi de 1242, 957 e 902 $kg\ ha^{-1}$, respectivamente. Os maiores valores de produtividade obtidos para Pajeú,

Marataoã e Rouxinol foram 1335 kg ha⁻¹ no turno de 4 dias, 1069 kg ha⁻¹ no turno de 6 dias e 1003 kg ha⁻¹ no turno de 2 dias, respectivamente (Tabela 5).

Resultado semelhante foi observado na variável massa seca total de grãos por planta (MSG). A cultivar BRS Pajeú apresentou as maiores médias nos turnos de 4, 6 e 8 dias com, aproximadamente, 2,73, 3,00 e 4,06 g a mais que as demais cultivares, respectivamente. A cultivar BRS Rouxinol apresentou a maior média para esta característica no turno de 2 dias com, aproximadamente, 0,875 g a mais que as demais cultivares (tabela 5).

Segundo Freire Filho et al. (2011b), as cultivares BRS Marataoã e BRS Pajeú apresentam média para massa de 100 grãos de 15 e 21 g, respectivamente, em boas condições de plantio. Para 'BRS Rouxinol', de acordo com Alcântara et al. (2002), a massa de 100 grãos apresenta média de 17 g em boas condições de plantio. No presente estudo, foram observados valores para esta variável acima das médias descritas por Freire Filho et al. (2011b) para Marataoã e valores abaixo da média para Pajeú. Rouxinol apresentou valores para esta variável acima da média descrita por Alcântara et al. (2002). Entretanto, não foi observada diferença significativa entre cultivares e entre turnos de rega para esta variável, obtendo-se uma média geral para massa de cem grãos de 18,5 g.

Silva (2011), avaliando componentes de produtividade das cultivares BRS Pajeú e BRS Marataoã em Vitória da Conquista - BA sob condições ideais de cultivo, encontrou valores para número de vagens por planta de 14,5 e 14,1; para número de grãos por planta de 107,9 e 97,0; para massa total de grãos por planta de 20,80 e 18,74 g; para massa de cem grãos de 18,5 e 19,3 g, e produtividade de 1.556,59 e 1.223,96 kg ha⁻¹, respectivamente. Teixeira et al. (2010), avaliando a qualidade fisiológica de sementes de 'BRS Marataoã' e 'BRS Rouxinol' nas condições edafoclimáticas do cerrado goiano, observaram valores para número de vagens por planta de 18 e 20; para massa de cem grãos de 17 e 16 g, e produtividades de 1392 e 1467 kg ha⁻¹, respectivamente.

Tabela 5. Médias para o número de vagens por planta (NVP), número total de grãos por planta (NTG), massa total de grãos por planta (MTG), massa seca total de grãos por planta (MSG), massa de cem grãos (M100), teor de N amoniacal na semente (TNS), teor de N amoniacal na parte aérea (TNA), pegada hídrica azul (PHA) e produtividade (PROD)

CULTIVAR	NVP	NTG	MTG (g)	MSG (g)	M100 (g)	TNS (g kg ⁻¹)	TNA (g kg ⁻¹)	PHA (m ³ ton ⁻¹)	PROD (kg ha ⁻¹)
Turno de Rega de 2 dias									
C1	5,00 a	50,5 b	10,13 a	8,97 a	20,45 a	40,99 a	32,5 b	3674 ab	1013 a
C2	6,25 a	57,5 a	9,04 b	7,42 b	15,70 a	39,77 a	43,2 a	3751 a	904 b
C3	5,25 a	50,7 b	10,03 b	9,07 a	20,17 a	38,97 a	38,6 a	3324 b	1003 b
Turno de Rega de 4 dias									
C1	7,75 a	74,0 a	13,35 a	11,42 a	18,10 a	37,24 a	37,0 b	2578 b	1335 a
C2	5,25 a	50,0 b	9,19 b	8,77 b	18,83 a	38,67 a	40,6 a	3490 ab	919 b
C3	6,00 a	52,2 b	9,68 b	8,62 b	19,35 a	39,42 a	40,5 a	3552 a	968 b
Turno de Rega de 6 dias									
C1	6,75 a	74,0 a	12,91 a	11,44 a	17,33 a	36,49 a	37,5 b	2557 b	1291 a
C2	6,25 a	58,0 b	10,69 b	9,51 b	18,67 a	37,92 a	43,1 a	2869 ab	1069 b
C3	5,50 a	47,5 b	8,42 b	7,36 b	17,85 a	37,72 a	45,0 a	3518 a	842 b
Turno de Rega de 8 dias									
C1	6,75 a	69,0 a	13,31 a	11,76 a	19,35 a	36,49 a	42,1 b	2299 b	1331 a
C2	4,75 a	55,2 b	9,37 b	8,32 b	17,15 a	39,79 a	46,3 a	3196 ab	937 b
C3	4,50 a	41,5 b	7,95 b	7,07 b	19,00 a	37,77 a	48,7 a	3869 a	795 b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna e dentro do mesmo turno de rega não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey. C1 = 'BRS Pajeú', C2 = 'BRS Marataoá', C3 = 'BRS Rouxinol'.

Tomaz (2020), avaliando a interação entre cultivares de feijão-caupi e ambientes no estado do Ceará e sua adaptabilidade, estabilidade e produtividade de grãos secos, encontrou em Pajeú e Marataoã, valores para número de vagens por planta de 5 e 3; e para massa de cem grãos de 18,6 e 17,3 g, respectivamente. O autor ainda recomenda a cultivar BRS Pajeú como uma das que apresentaram maior potencial para o cultivo no estado do Ceará, uma vez que atendeu ao padrão de preferência do produtor cearense, destacando-se quanto à maioria dos componentes de produção e apresentando alta produtividade de grãos secos, adaptabilidade e estabilidade às condições ambientais da região.

Freitas et al. (2013) relataram que plantas de feijão-caupi submetidas ao estresse hídrico apresentaram maiores médias para massa e tamanho de sementes, entretanto, estas apresentaram menor qualidade fisiológica. Os autores também consideraram que o sistema plantio direto proporcionou sementes com melhor qualidade fisiológica, e que estresse hídrico aplicado após o florescimento reduziu a quantidade de sementes.

Os componentes mais importantes da produtividade de grãos são o número de vagens por planta (NVP) e o número de grãos por planta (NTG), segundo Stoilova e Pereira (2013). Para Bezerra et al. (2018), o principal componente de produção do feijão-caupi é o número de vagens por planta.

Costa Júnior et al. (2017) avaliando os efeitos de níveis de irrigação (40%, 70%, 100%, 130% e 160% de ETo) sobre plantas de caupi, verificaram redução em NVP à medida que os níveis de irrigação decresciam, com variação de 8,5 a 4,7 VP entre os níveis de 160 e 40% de ETo. Hara et al. (2022) avaliando o efeito de seis níveis de reposição de água (20, 40, 60, 80 e 100% da capacidade de campo) na fase vegetativa (pré-floração) do caupi, verificaram aumento linear para NVP e massa de cem grãos, à medida que o fornecimento de água aumentava, com valores variando de 1,2 a 2,6; e 5,6 e 8,5 g para estas duas variáveis, respectivamente. Os autores consideraram que os valores muito abaixo do observado em outros trabalhos estão associados ao tipo de solo.

Bastos et al. (2012) constataram que a produtividade de grãos verdes na cultura do feijão-caupi correlaciona positivamente com o potencial de água da folha, o índice de área foliar e o teor de clorofila total, e que estas quatro

características são influenciadas negativamente com a redução na disponibilidade de água para as plantas.

Entretanto, Tagliaferre et al. (2013) observaram redução para NVP com aumento das lâminas de irrigação. Mousa e Qurashi (2018), também observaram que a irrigação plena em todo ciclo do feijão-caupi não promove as maiores produtividades para a cultura. Estes resultados podem explicar as médias reduzidas nos componentes de produtividade das três cultivares no turno de rega de 2 dias.

O feijão-caupi é uma cultura classificada como moderadamente tolerante ao déficit hídrico, porém pode apresentar tolerância ao excesso de água (Boyer, 1978). Guimarães et al. (2020) sugerem que é possível o produtor economizar nos custos do manejo de irrigação para o feijão-caupi, dependendo das condições edafoclimáticas e da cultivar, para obter boa produtividade com menores frequências de irrigação.

Nascimento et al. (2004) observaram reduções no NVP com o aumento do déficit hídrico. Os autores observaram decréscimos de aproximadamente 3; 9 e 22% para o número de grãos por vagem, e reduções de aproximadamente 16; 32 e 49% para o NVP, quando comparadas à testemunha. No presente trabalho, não foi observada diferença significativa para NVP entre as cultivares e nem entre os turnos de rega (Tabela 5).

As médias de 'BRS Marataoã' e 'BRS Rouxinol' para a variável teor de nitrogênio na parte aérea (TNA) não diferiram significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, apresentando as maiores médias para esta variável em todos os turnos de rega. Nos turnos de 2 e 4 dias, 'BRS Marataoã' apresentou maior diferença entre médias que 'BRS Rouxinol' em relação a 'BRS Pajeú', com 10,7 e 3,6 g a mais de N amoniacal por kg de matéria seca da parte aérea. Nos turnos de 6 e 8 dias, 'BRS Rouxinol' apresentou maior diferença entre médias que 'BRS Marataoã' em relação a 'BRS Pajeú', com 7,5 e 6,6 g a mais de N amoniacal por kg de matéria seca da parte aérea (Tabela 5).

Todas as cultivares, para o teor de N amoniacal na parte aérea (TNA), ajustaram-se linearmente para os efeitos dos tratamentos de turno de rega com aumento dos teores de N à medida que os intervalos de turno aumentaram. As médias para esta variável entre os turnos variaram de 32,5 a 42,1 g kg⁻¹; de 43,2 a 46,3 g kg⁻¹; e de 38,6 a 48,7 g kg⁻¹ para Pajeú, Marataoã e Rouxinol,

respectivamente. Houve aumento entre as médias dos turnos de 2 e 8 dias para TNA de aproximadamente 9,6, 3,1 e 10,1 g kg⁻¹ para ‘BRS Pajeú’, ‘BRS Marataoã’ e ‘BRS Rouxinol’, respectivamente. Estimou-se a cada aumento de um dia no turno de rega, aumento em TNA de aproximadamente 9,3, 11,2 e 10,9 g kg⁻¹ para ‘BRS Pajeú’, ‘BRS Marataoã’ e ‘BRS Rouxinol’, respectivamente (Figura 8A).

Alfaia (1997) avaliando plantas de feijão-caupi adubadas com duas fontes nitrogenadas: ureia e sulfato de amônio, ambos enriquecidos com ¹⁵N, observou que a absorção de N dos fertilizantes pela parte aérea das plantas foi pequena, cerca de 13,9 e 18,5% do sulfato de amônio e da ureia aplicados, respectivamente. Segundo a autora, o caupi, possivelmente, absorveu mais N do solo e do ar pela fixação biológica deste nutriente devido à simbiose com estirpes de rizóbio presentes no solo, e que os resultados encontrados indicam que a quantidade de N presente no solo e a proveniente da simbiose foram suficientes para suprir a necessidade da cultura por este nutriente.

No presente trabalho, não foram encontrados nódulos nas raízes coletadas aos 52 DAS, possivelmente por inviabilidade do inóculo aplicado, também não foi feita adubação nitrogenada. Entretanto, os valores de TNA estavam acima dos valores encontrados por Alfaia (1997), mesmo nos tratamentos com maiores intervalos de turno de rega. Estes resultados indicam que, possivelmente, o substrato é rico em N e as sementes possuem boa reserva de N, ambos associados supriram a necessidade da cultura por este nutriente na fase inicial do ciclo.

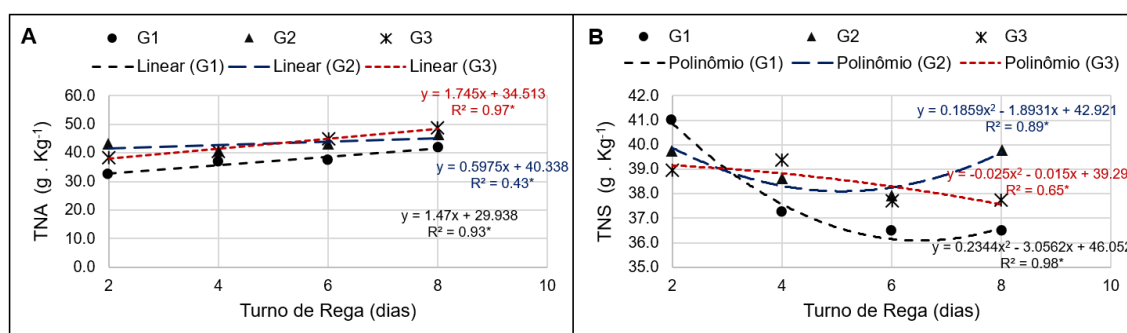


Figura 8. Gráficos de regressão das variáveis teor de nitrogênio na parte aérea (TNA) (A) e teor de nitrogênio na semente (TNS) (B) das cultivares BRS Pajeú (G1), BRS Marataoã (G2) e BRS Rouxinol (G3) em função dos intervalos de rega de 2, 4, 6 e 8 dias.

Segundo Oliveira e Dantas (1988), o feijão-caupi depende do N da semente e do N do solo até os 20 dias após a emergência (DAE) e, em boas condições de solo e da planta, para haver uma simbiose efetiva, é dispensada a adubação mineral nitrogenada. A necessidade do feijão-caupi em N é suprida pela FBN a partir dos 25 DAE, estendendo-se até a floração, que ocorre normalmente entre 45 e 55 DAE, para cultivares de porte determinado, e entre 75 e 90 dias para os de porte indeterminado (Brito et al., 2011).

Ao avaliar os efeitos de cinco fontes de N (3 estirpes de rizóbio, adubo mineral e controle - sem adubação e sem inoculação) em dois ambientes (com e sem restrição hídrica), Santos (2020) relatou que não houve diferença entre os teores de N na parte aérea obtidos nos tratamentos controle (com e sem N) e os tratamentos com inoculação no cenário com restrição hídrica. As maiores médias encontradas pela autora para o teor de N da parte aérea de feijão-caupi com restrição hídrica foram de 9 g kg^{-1} de matéria seca e sem restrição hídrica foi 13 g kg^{-1} . Estes resultados não corroboram com os valores encontrados, sendo os maiores valores encontrados no turno de 8 dias com médias entre 42,1 e 48,7 g kg^{-1} de matéria seca da parte aérea.

Silva Júnior (2012), avaliando a resposta de feijão-caupi a diferentes tipos de inóculo e adubação mineral nitrogenada em plantio não irrigado no campo no Centro-Oeste, encontrou os maiores teores de N na parte aérea de, aproximadamente, 45 g kg^{-1} e 41 g kg^{-1} , nos tratamentos com N mineral e turfa, respectivamente. Estes resultados se assemelham aos encontrados no presente trabalho.

O aparecimento dos primeiros botões florais foi observado aos 38 DAS na cultivar BRS Pajeú no turno de rega de 2 dias (T2), porém o florescimento foi desuniforme entre os blocos, entre as cultivares e entre os turnos de rega, atrasando e desuniformizando também a colheita. Em sequência, o florescimento foi observado aos 40 DAS para 'BRS Pajeú' no T4 (4 dias) da cultivar; aos 42 DAS para 'BRS Marataoã' com T2; aos 45 DAS para 'BRS Rouxinol' com T2 e TR4; aos 48 DAS para 'BRS Marataoã' com TR4 e 'BRS Pajeú' com T6 (6 dias); aos 52 DAS para 'BRS Pajeú' com T8 (8 dias) e 'BRS Marataoã' com T6; aos 56 DAS para 'BRS Marataoã' com T8 e 'BRS Rouxinol' com T6; e aos 61 DAS para 'BRS Rouxinol' com T8.

Segundo Ritchie (1981), o déficit hídrico pode causar abscisão foliar, redução da brotação, polinização, translocação de nutrientes e fotoassimilados, abortamento de vagens e redução no enchimento de grãos. O estresse hídrico durante a fase vegetativa pode provocar redução na taxa fotossintética e no crescimento, causando menor produção de flores, vagens e reduzindo o número de grãos por vagem (Nascimento et al., 2004).

Além do déficit hídrico, o crescimento e o desenvolvimento das plantas de feijão-caupi podem ser afetados por temperaturas elevadas, causando abortamento floral, redução no vingamento de vagens e no número de grãos por vagem, sendo a faixa ideal de temperatura entre 18 e 34°C para o bom desenvolvimento da cultura (Andrade Júnior et al., 2002). Durante o período de condução do experimento, foram registradas temperaturas acima de 34°C dentro da casa de vegetação, sendo este, possivelmente, um dos fatores de causa do número acentuado de abortos. Entretanto, após as aplicações de solução nutritiva, houve rápida brotação de folhas novas com verde mais intenso, seguida de redução no número de abscisões foliares e de abortos, e vagens com maior número de sementes. Apesar do déficit hídrico na fase vegetativa e da temperatura elevada, as plantas de caupi apresentaram boas respostas à adubação com solução nutritiva associada à irrigação na fase reprodutiva, indicando que o caupi é uma cultura com alta plasticidade.

As médias de teor de N amoniacal na semente (TNS) da cultivar BRS Rouxinol, ajustaram-se linearmente para os efeitos dos turnos de rega, aumentando o TNS em 0,45 g kg⁻¹ entre os turnos de 2 e 4 dias, e diminuindo em 1,65 g kg⁻¹ entre os turnos de 4 e 8 dias. As médias para esta variável nesta cultivar variaram de 39,42 a 37,72 g kg⁻¹. Estimou-se redução de aproximadamente 9,59 g kg⁻¹ em TNS para esta cultivar a cada aumento de um dia no turno de rega. 'BRS Pajeú' e 'BRS Marataoã' tiveram ajuste quadrático para os efeitos dos turnos de rega. Foi observada redução de 4,5 g kg⁻¹ em TNS entre os turnos de 2 e 8 dias para a cultivar BRS Pajeú, com médias variando de 40,99 a 36,49 g kg⁻¹; e redução de 1,85 g kg⁻¹ em TNS entre os turnos de 2 e 6 dias, e aumento de 1,87 g kg⁻¹ entre os turnos de 6 e 8 dias para 'BRS Marataoã', com médias variando de 39,79 a 37,92 g kg⁻¹ (Figura 8B).

Alfaia (1997) observou que as sementes, produzidas por plantas de feijão-caupi adubadas com 30 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio ou ureia, continham cerca

de 22,6 e 25,3% do total oriundos destas fontes nitrogenadas aplicadas, respectivamente.

Costa et al. (2011), avaliando os efeitos de seis fontes de N (5 estirpes de rizóbio e testemunha 70 kg ha⁻¹ de ureia) e controle (sem adubação e sem inoculação), encontraram diferença significativa entre os teores de N nas sementes em cada tratamento. As maiores médias encontradas pelos autores para esta variável foram 38 g kg⁻¹ de N, na testemunha adubada com ureia, e 36 g kg⁻¹ de N, em um dos tratamentos com inoculação. Estes resultados corroboram com os valores encontrados no presente trabalho.

Favaratto et al. (2011), avaliando a influência de doses de adubação nitrogenada na qualidade fisiológica de sementes de sorgo, observaram que o aumento de doses de nitrogênio promoveu maior teor de nitrogênio nas sementes e maior vigor destas, quando foram avaliadas em teste de envelhecimento acelerado. Os autores também afirmam que a quantidade de nitrogênio absorvido durante o ciclo da cultura exerce forte influência no teor proteico das sementes.

A qualidade de sementes pode ser influenciada pelo conteúdo de N, pois este compõe parte da estrutura de biomoléculas nas plantas. Durante a fase de enchimento de grãos em algumas culturas, ocorre competição de fotoassimilados entre as reações de síntese de amido e de proteínas. A composição química da semente, as estruturas de reserva, a formação do embrião e o desempenho fisiológico da semente podem ser influenciados pela disponibilidade de nutrientes. Atributos físicos, genéticos, fisiológicos e fitossanitários característicos da espécie, variedade ou incorporados a cultivar são fatores que predizem a qualidade das sementes. Para a cultura do feijão, é importante que as sementes tenham qualidade (Kolchinski e Schuch, 2004).

Ocorreu efeito significativo das cultivares sobre o componente azul da pegada hídrica (PHA), porém não houve efeito significativo dos turnos de rega sobre esta característica (Figura 9).

A cultivar BRS Rouxinol apresentou as maiores médias para PHA (3551,5, 3518,3 e 3869 m³ ton⁻¹) nos turnos de 4, 6 e 8 dias, com 518, 805 e 1122 m³ ton⁻¹ a mais que a média das demais cultivares nestes turnos, respectivamente, sendo a cultivar que teve a menor produtividade com o maior consumo de água durante o ciclo da cultura. BRS Pajeú apresentou as menores médias para esta variável (2578,3, 2556,8 e 2299 m³ ton⁻¹) nos turnos de 4, 6 e 8 dias, com 942, 637 e 1233

$\text{m}^3 \text{ ton}^{-1}$ a menos que a média das demais cultivares nestes turnos, respectivamente.

No turno de 2 dias, a BRS Marataoã apresentou média $252 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$ mais alta que as demais cultivares para esta característica. Para esta variável, é interessante que a cultivar apresente menores valores, pois indica ser mais adaptável e ter maior capacidade produtiva em condições de estresse hídrico. Além disto, pode ser um indicador para o produtor, que economizará nos custos do manejo de irrigação do feijão-caupi para obter boa produtividade com menores frequências de irrigação (Guimarães et al., 2020).

Almeida et al. (2019) determinaram a pegada hídrica total do feijão comum irrigado no semiárido brasileiro e relataram que foram necessários 5.507 m^3 de água para produzir 1,2 toneladas de feijão comum, ou seja, 5.507 L de água para produzir $1,2 \text{ kg}$ de feijão, que segundo os autores é um valor baixo para a produtividade da cultura, e, portanto, considera este valor da pegada hídrica como alto para o feijão comum.

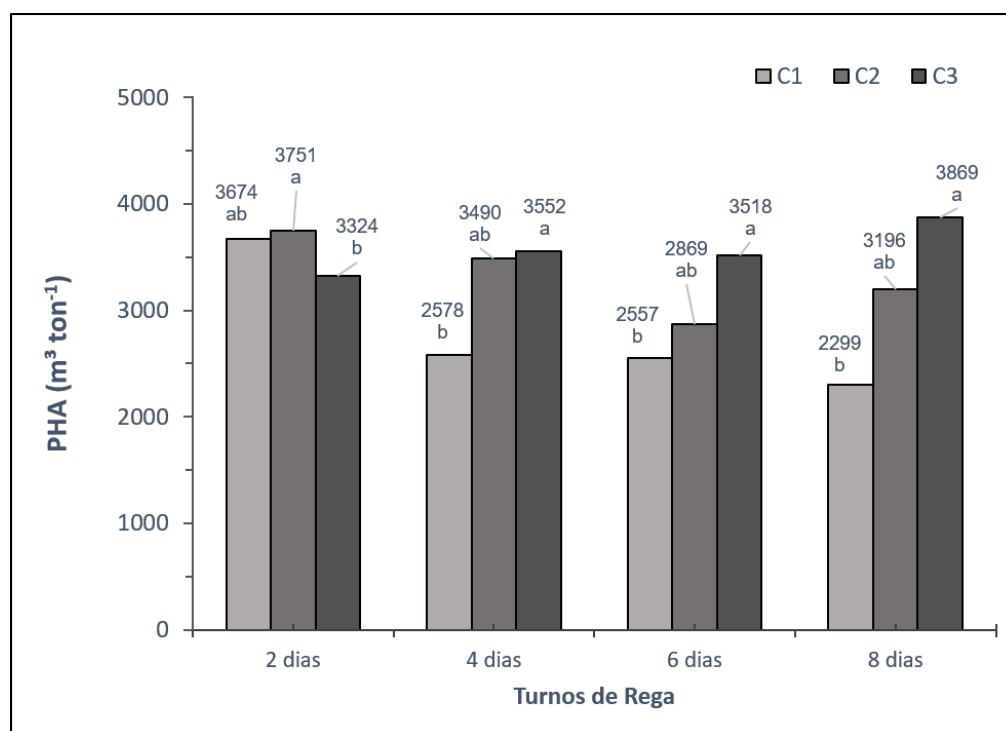


Figura 9. Médias da pegada hídrica azul das cultivares BRS Pajeú (C1), BRS Marataoã (C2) e BRS Rouxinol (C3) em função dos intervalos de turnos de rega de 2, 4, 6 e 8 dias.

Costa et al. (2016) avaliaram a pegada hídrica de cinco cultivares de soja e encontraram valores variando entre $1.306 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$ e $1.015 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$. Silva et al. (2016), avaliando o consumo hídrico do feijão-caupi na fase de desenvolvimento vegetativo relataram 159 mm e para todo o ciclo da cultura o consumo foi 400,1 mm.

A média global para a pegada hídrica do feijão-caupi é de 6841 (componente verde), 10 (componente azul), 55 (componente cinza) e 6906 (Pegada hídrica total) $\text{m}^3 \text{ ton}^{-1}$ (Mekonnen et al., 2011). Esses valores mostram a importância das chuvas para a cultura, já que o componente verde representa a água de precipitação (Hoekstra et al., 2011).

A agricultura é responsável por 69% do consumo global de água doce ($2769 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$), indo desde a irrigação das culturas e o uso na pecuária até o uso na aquicultura (FAO, 2016). Segundo Ringler et al. (2010), até o ano de 2050 a disponibilidade de água doce no mundo poderá reduzir 50% e as demandas poderão aumentar 30%, com o crescimento populacional, sem considerar os efeitos das mudanças climáticas. Assim, conhecer as necessidades hídricas das culturas é importante para o planejamento da agricultura no cenário de escassez hídrica futuro, com o estabelecimento de ações concretas para a sustentabilidade da água na agricultura.

6. RESUMO E CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, concluiu-se que as características morfológicas (altura de plantas, número de folhas, área foliar, diâmetro do caule, massa fresca e seca da parte aérea) de cultivares de feijão-caupi avaliadas (BRS Pajeú, BRS Marataoã e BRS Rouxinol) são afetadas negativamente em situações de limitação hídrica. Entretanto, teores elevados de água no substrato promoveram desenvolvimento vegetativo excessivo das plantas de feijão-caupi.

O teor de clorofila, medido pelo índice SPAD, não foi afetado pelo déficit hídrico. O potencial hídrico foliar das três cultivares avaliadas reduz à medida que a restrição hídrica se agrava, com maiores reduções nas horas mais quentes do dia. A cultivar BRS Marataoã, quando comparada às cultivares BRS Pajeú e BRS Rouxinol, foi a que mostrou maior plasticidade e tolerância ao estresse hídrico, ao se comparar as avaliações de pré e pós-irrigação da relação F_v/F_m e do índice Plabs. A cv. BRS Rouxinol apresentou maior sensibilidade às condições de escassez hídrica impostas. A redução nos valores de Plabs com os intervalos de turno de rega, não afetou a produtividade das cultivares, estando as médias obtidas para esta variável dentro da faixa de médias descritas pela EMBRAPA. Tanto as plantas de feijão-caupi submetidas aos maiores intervalos de turno de rega, como as submetidas aos menores intervalos, tiveram a condutância estomática das folhas triplicada após a irrigação.

O número de vagens por planta e a massa de 100 grãos não foram afetados pelo déficit hídrico, tendo como médias gerais 5,8 vagens e 18,5 g. As

cultivares BRS Marataoã e BRS Rouxinol apresentaram os maiores teores de N na parte aérea em todos os turnos de rega, sendo os maiores teores observados na situação com maior restrição de água (turno de 8 dias). Assim, esta variável foi influenciada positivamente pelo déficit hídrico. Entretanto, todas as cultivares apresentaram teores semelhantes de nitrogênio na semente, porém esta característica apresentou pequena redução nas sementes provenientes de plantas que passaram por períodos maiores de restrição hídrica.

A cultivar BRS Pajeú apresentou as maiores médias para as variáveis número total de grãos (NTG), massa fresca de grãos (MTG), massa seca de grãos (MSG) e produtividade (PROD). Esta cultivar destacou-se também por apresentar o menor valor para o componente azul da pegada hídrica, apresentando maior produtividade com menor consumo de água durante o ciclo da cultura. Desta forma, conclui-se pela rusticidade, adaptabilidade e maior média geral em produtividade de grãos secos (aproximadamente, 1242 kg ha^{-1}), nas condições estabelecidas no experimento, que a cv. BRS Pajeú é a mais indicada para o cultivo em condições de restrição de fornecimento de água na irrigação com turnos de rega mais espaçados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcântara, J. dos P., Rocha, E.M.M., Marques, H.S., N. Neto, J.G., Vasconcelos, O.L., Dourado, V.V., Freire filho, F.R., Ribeiro, V.Q., Silva, E.P. da, Lima, J.G., Alves, J.R., Lopes, P.V.L., Amorim, R., Silva, W.P. da (2002) BRS Rouxinol - Nova Cultivar de Feijão Caupi. *EMBRAPA Meio-Norte: transferência de tecnologia*. Teresina, PI. (Folheto)
- Alfaia, S.S. (1997) Destino de fertilizantes nitrogenados (^{15}N) em um latossolo amarelo cultivado com feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). *Acta Amazonica*, 27 (2): 65-72.
- Almeida, F.S., Mingotte, F.L.C., Lemos, L.B., Santana, M.J. (2017) Desempenho agrônômico de cultivares de feijão-caupi em função das épocas de semeadura no Cerrado de Uberaba-MG. *Revista Caatinga*, 30 (2):361-369.
- Almeida, R.S.R., Silva, M.T., Campos J.H.B.C., Holanda, R.M., Dantas Neto, J., Matsunaga, W.K., Silva, V.P.R. (2019) Pegada hídrica de plantas hortícolas cultivadas no semiárido brasileiro. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 10 (4):45-56.
- Andrade Júnior, A.S. de, Santos, A.A. dos, Sobrinho, C.A., Bastos, E.A., Melo, F. de B, Viana, F.M.P. (2002) Cultivo do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) *Teresina: Embrapa Meio-Norte*, 108 p.

- Angelocci, L.R. (2002) Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: Introdução ao tratamento biofísico. *Piracicaba: ESALQ/USP*, 268p.
- Araújo, S.A. do C., Deminicis, B.B. (2009) Fotoinibição da fotossíntese. *Revista Brasileira de Biociências*, 7 (4):463-472.
- Araújo, K.C. (2019) Avaliação de linhagens melhoradas de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) na região noroeste fluminense para estudo de valor de cultivo e uso. *Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro*, 115p.
- Azevedo, H.J. (2002) Uma análise da cadeia produtiva da cana-de-açúcar na Região Norte Fluminense. Observatório Socioeconômico da Região Norte Fluminense. *Boletim Técnico*, Campos dos Goytacazes, RJ, n. 6, 51 p.
- Babalola, O. (1980) Water relations of three cowpea cultivars [*Vigna unguiculata* (L.) Walp]. *Plant and Soil*, 56:59-69.
- Bastos, E.A., Ramos, H.M.M.R., Andrade Júnior, A.S. de, Nascimento, F.N. do, Cardoso, M.J. (2012) Parâmetros fisiológicos e produtividade de grãos verdes do feijão-caupi sob déficit hídrico. *Water Resources and Irrigation Management*, 1 (1):31-37.
- Bezerra, A.A.C., Costa Filho, R.S., Oliveira, S.R.M., Freire Filho, F.R. (2018) Morphophysiological biometry and grain production in cowpea under different phosphorus levels. *Comunicata Scientiae*, Teresina, 9 (2):275-281.
- Boaretto, A.E., Raij, B.V., Silva, F.C., Chitolina, J.C., Tedesco, M.J., Carmo, C.A. F.S. (2009) Amostragem acondicionamento e preparo de amostras de plantas para análise química. *In: Silva, F. C. (Org.). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. v.2. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica*, p.59-86.

- Bocchiola, D., Nana, E., Soncini, A. (2013) Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po valley of Italy. *Agric. Water Manag.* 116:50-61.
- Bolhár-Nordenkampf, H.R., Long, S.P., Baker, N.R., Öquist, G., Schreiber, U., Lechner, E.G. (1989) Chlorophyll fluorescence as a probe of the photosynthetic competence of leaves in the field: a review of current instrumentation. *Funct. Ecol.* 3:497-514.
- Borges, W.L., Rumjanek, N.G., Zilli, J.É., Silva, M.A. da, Araújo, A.P. (2019) Inoculação em feijão-caupi na Amazônia Oriental originado de sementes enriquecidas com molibdênio. *In: Congresso Nacional de Feijão-Caupi, 5., Fortaleza. Sustentabilidade e inovações tecnológicas para o feijão-caupi: desafios e perspectivas: anais. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará: Embrapa Meio-Norte. p.1-5.*
- Boyer, J.S. (1978) Water deficits and photosynthesis. *In: Kozlowski, T.T. (ed.) Water deficits and plant growth. New York: Academic Press, v.4, p.154-191.*
- Brito, M. de M.P., Muraoka, T., Silva, E.C. da (2011) Contribuição da fixação biológica de nitrogênio, fertilizante nitrogenado e nitrogênio do solo no desenvolvimento de feijão-caupi. *Bragantia, Campinas, 70 (1):206-215.*
- Brito, L.F. de. (2013) *Inoculação da Nodulação em Cultivares de Feijoeiro. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Seropédica - RJ, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 56p.*
- Carvalho, N.L. de, Zobot, V. (2012) Nitrogênio: nutriente ou poluente? *Rev. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, Santa Maria-RS, 6 (6):960-974.*
- Carvalho, J.J., Saad, J.C.C., Teixeira, M.B., Alves Júnior, J., Di Campos, M.S., Horschutz, A.C.O., Cunha, F.N. (2016) Growth and production of common

bean in direct seeding under irrigated deficit condition. *African Journal of Agricultural Research*, 11 (31):2841-2848.

Catuchi, T.A., Guidorizzi, F.V.C., Guidorizzi, K.A., Barbosa, A. de M., Souza, G.M. (2012) Respostas fisiológicas de cultivares de soja à adubação potássica sob diferentes regimes hídricos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 47 (4):519-527.

Chagas, W.F.T. (2018) Tecnologias de fertilizantes nitrogenados na cafeicultura. *Tese (Doutorado em Ciência do Solo)* – Lavras - MG, Universidade Federal de Lavras, 141p.

Coelho, J.B.M., Barros, M. de F.C., Bezerra Neto, E., Correa, M.M. (2013) Comportamento hídrico e crescimento do feijão *Vigna* cultivado em solos salinizados. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17 (4):379-385.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. (2018) Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, *Brasília, DF*, v. 5 - safra 2017/18, n. 4 quarto levantamento, Janeiro 2018.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. (2022) Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, *Brasília, DF*, v. 9, safra 2021/22, n. 12 décimo segundo levantamento, setembro 2022.

CONAC - Congresso Nacional de Feijão-Caupi, 3. (2012) Belém, PA: <http://www.conac2012.org/congresso.html> Acesso em: 20/10/2020 página mantida pela CONAC.

Costa, E.M., Nóbrega, R.S.A., Martins, L. de V., Amaral, F.H.C., Moreira, F.M. de S. (2011) Nodulação e produtividade de *Vigna unguiculata* (L.) Walp por cepas de rizóbio em Bom Jesus, PI. *Revista Ciência Agronômica*, 42 (1):1-7.

- Costa, D.C., Martorano, L.G., Marques, M.C., El-husny, J.C., Nacif, A. (2016) Pegada hídrica como indicador de sustentabilidade em polo de grãos na amazônia. *Enciclopédia Biosfera*, Centro Científico Conhecer - Goiânia, 13 (23):920-929.
- Costa Junior, M. de J.N. da, Bastos, E.A., Cardoso, M.J., Andrade Júnior, A.S. de (2017) Agronomic performance of the cowpea under different irrigation depths and row spacing. *Rev. Ciênc. Agron.* 48 (5):774-782.
- Doyle, J.J. (1994) Phylogeny of the legume family: an approach to understanding the origins of nodulation. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 25:325-349.
- Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2001) Circular Técnica 46. Manejo integrado de pragas do feijoeiro. Goiás: *Embrapa Arroz e Feijão*, 28p. ISSN 1678-9636
- Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2016) A Cultura do Feijão-caupi no Brasil. Teresina: *Embrapa Meio-Norte*, 10p.
- Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2017) Cultivo de Feijão-Caupi. Teresina: *Embrapa Meio-Norte*. 2ª edição, 10p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/161165/1/SistemaProducaoCaupiCapituloCultivares.pdf> . Acesso em: 05/05/2021
- Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2018) Conhecendo a fenologia do feijoeiro e seus aspectos fitotécnicos. [Oliveira, M.G. de C., Oliveira, L.F.C. de, Wendland, A., Guimarães, C.M., Quintela, E.D., Barbosa, F.R., Carvalho, M. da C.S., Lobo Junior, M., Silveira, P.M. da]. Teresina: *Embrapa Meio-Norte*, 10p.
- Endres, L., Souza, J.L., Teodoro, L., Marroquim, P.M.G., Santos, C.M., Brito, J.E.D. (2010) Gas exchange alteration caused by water deficit during the bean

- reproductive stage. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14:11-16.
- FAO: FAOSTAT on-line database (2008). Food and Agriculture Organization, Rome. <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>
Acesso em: 26/04/2021.
- FAO: FAOESTAT. Home Page (2015). Disponível em: <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>.
Acesso em: 21/10/2020.
- FAO: FAOESTAT. Home Page (2016) Water Withdrawal By Sector, Around 2010. Aquastat, (November), p.2–3. Disponível em: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/tables/WorldDataWithdrawal_eng.pdf>
Acesso em: 20/10/2020
- FAO: FAOESTAT. Crops. Cow peas, dry. (2018). Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E>> Acesso em: 09/07/2021.
- Farias, M.E. de (2014) Estudo da cadeia de transporte de elétrons fotossintético em folhas destacadas de ervilha. *Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal)* – Pelotas – RS, Universidade Federal de Pelotas, 60p.
- Farias, V.D. da S., Lima, M.J.A. de, Nunes, H.G.G.C., Sousa, D. de P., Souza, P.J. de O.P. de (2017) Water demand, crop coefficient and uncoupling factor of cowpea in the eastern amazon *Revista Caatinga*, 30 (1):190-200.
- Favarato, L.F., Paula, G.S., Espindula, M.C., Rocha, V.S. (2011) Avaliação de linhagens de sorgo vassoura na região de viçosa, MG, Brasil. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 10 (1):82-86.
- Ferreira, D.F. (2011) Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciênc. agrotec.*, Lavras, 35 (6):1039-1042.

- Freire Filho, F.R., Ribeiro, V.Q., Alcântara, J. dos P., Belarmino Filho, J., Rocha, M. de M. (2004) BRS Marataoã - Cultivar de feijão-caupi com grão sempre-verde. *Embrapa: Meio-Norte*, Teresina – PI. (Folheto)
- Freire Filho, F.R., Lima, J.A.A., Ribeiro, V.Q. (2005a) Feijão-caupi: avanços tecnológicos. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, Teresina: *Embrapa Meio Norte*, 1:27-92.
- Freire Filho, F.R., Ribeiro, V.Q., Alcântara, J. dos P., Belarmino Filho, J., Rocha, M. de M. (2005b) BRS Marataoã: Novo cultivar de feijão-caupi com grão tipo sempre-verde. *Revista Ceres*, 52:771-777.
- Freire Filho, F.R., Raposo, J.A.A., Costa, A.F. da, Rocha, M. de M., Ribeiro, V.Q., Silva, K.J.D. e, Carvalho, H.W.L. de, Cravo, M. da S., Lopes, A. de M., Vilarinho, A.A., Cavalcante, E. da S., Fernandes, J.B., Lima, J.M.P. de, Sagrilo, E., Sittolin, I.M., Souza, F. de F., Vieira Júnior, J.R., Gonçalves, J.R.P. (2009) BRS Pajeú - Cultivar de feijão-caupi com grão mulato-claro. *Embrapa Meio-Norte*, Teresina – PI. (Folheto)
- Freire Filho, F.R., Ribeiro V.Q., Rocha, M.M., Silva, K.J.D., Nogueira, M.S., Rodrigues, E.V. (2011a) Feijão-Caupi no Brasil: Produção, melhoramento genético, avanços e desafios. Teresina: *Embrapa Meio-Norte*, 80p.
- Freire Filho, F.R., Ribeiro, V.Q., Rocha, M. de M., Silva, K.J.D. e, Nogueira, M. do S. da R., Rodrigues, E.V. (2011b) Produção, melhoramento genético e potencialidades do feijão-caupi no Brasil. *IV Reunião nacional de Biofortificação*. Teresina-PI, 21p.
- Freitas, R.M.O. de, Torres, S.B., Nogueira, N.W., Leal, C.C.P., Farias, R.M. de (2013) Produção e qualidade de sementes de feijão-caupi em função de sistemas de plantio e estresse hídrico. *Pesq. Agropec. Trop.*, Goiânia, 43 (4):370-376.

- Gomes Filho, A., Rodrigues, E.N., Rodrigues, T.C., Santos, V.J.N., Alcântara, S.F., Souza, F.N. de (2019) Estresse hídrico e salino na germinação de sementes de feijão-caupi cv. BRS Pajeú. *Colloquium Agrariae*, 15 (4):60-73.
- Gonçalves, J.F.C., Santos Júnior, U.M. dos (2005). Utilization of the chlorophyll a fluorescence technique as a tool for selecting tolerant species to environments of high irradiance. *Brazilian Journal Plant Physiology*, 17: 307-313.
- Gonçalves, J.F. de C., Silva, C.E., Guimarães, D.G., Bernardes, R.S. (2010) Análise dos transientes da fluorescência da clorofila a de plantas jovens de *Carapa guianensis* e de *Dipteryx odorata* submetidas a dois ambientes de luz. *Acta amazonica*. 40(1): 89-98.
- Guimarães, D.G., Oliveira, L.M., Guedes, M.O., Ferreira, G.F.P., Prado, T.R., Amaral, C.L.F. (2020) Desempenho da cultivar de feijão-caupi brs novaera sob níveis de irrigação e adubação em ambiente protegido. *Cultura Agrônômica*, Ilha Solteira, 29 (1):61-75.
- Hara, F.A. dos S., Serudo, R.N., Vendruscolo, J., Inácio, A.C.F., Moura, R.P. de M. (2022) Resposta do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) a diferentes níveis de reposição de água na fase vegetativa. *Research, Society and Development*, 23. março. 2022. 11 (6): p.9. e15311629013.
- Hegab, A.S.A., Fayed, M.T.B., Hamada, M.M.A., Abdrabbo, M.A.A. (2014) Productivity and irrigation requirements of faba-bean in North Delta of Egypt in relation to planting dates. *Annals of Agricultural Science*, 59 (2):185-193.
- Herath, I., Green, S., Singh, R., Horne, D., Van der Zijpp, S., Clothier, B. (2013) Water footprinting of agricultural products: a hydrological assessment for the water footprint of New Zealand's wines. *J Clean Prod*, 41:232–43.
- Hoagland, D.R., Arnon, D.I. (1950) The water-culture method for growing plants without soil. *Califórnia: Agricultural experiment station*, 2 ed. 347p.

- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K. (2008) *Globalization of Water: Sharing the Planets Freshwater Resources*, Blackwell Publishing, Oxford.
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., Mekonnen, M.M. (2011) *The water footprint assessment manual: setting the global standard*. London: *Water Footprint Network*. Earthscan Publishing. 228p.
- Hoekstra, A.Y., (2013). Sustainable, efficient, and equitable water use: the three pillars under wise freshwater allocation. *Wiley Interdiscip. Rev. Water*, 1: 31-40.
- Hoff, H., Falkenmark, M., Gerten, D., Gordon, L., Karlberg, L., Rockström, J. (2010) Greening the global water system. *J Hydrol*, 384:177–86.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Normas climatológicas – Período de 1981 – 2010. (2020). Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/normais>>. Acesso em: 15 de abril de 2021.
- IPCC (2014) *Alterações Climáticas 2014: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade - Resumo para Decisores*. Contribuição do Grupo de Trabalho II para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas [Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (eds.)]. *Organização Meteorológica Mundial (WMO)*, Genebra, Suíça, 34p.
- Jackson, M.L. (1965) *Soil chemical analysis*. New Jersey: Prentice Hall, 498 p.
- Kolchinski, E.M., Schuch, L.O.B. (2004) Relações entre a adubação nitrogenada e a qualidade de grãos e de sementes em aveia branca. *Ciência Rural*, Santa Maria, 34 (2): 379-383.

- Lambrides, C.J., Godwin, I.D. (2007) Mungbean. In *Genome Mapping and Molecular Breeding in Plants, Volume 3: Pulses, Sugar and Tuber Crops*, Kole, C. (ed). Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, p. 69–90.
- Leite, L.F.C., Araújo, A.S.F. de, Costa, C. do N., Ribeiro, A.M.B. (2009) Nodulação e produtividade de grãos do feijão-caupi em resposta ao Molibdênio. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, 40 (4):492-497.
- Locatelli, V. da E.R., Medeiros, R.D. de, Smiderle, O.J.; Albuquerque, J. de A.A. de, Araújo, W.F. (2016) Desenvolvimento vegetativo de cultivares de feijão-caupi sob lâminas de irrigação no cerrado roraimense. *Irriga, Botucatu, Edição Especial, Grandes Culturas*, p. 28-39. ISSN 1808-3765.
- Lorensini, F., Ceretta, C.A., Giroto, E., Cerini, J.B., Lourenzi, C.R., De Conti, L., Trindade, M.M., Melo, G.W.B. de, Brunetto, G. (2012) Lixiviação e volatilização de nitrogênio em um Argissolo cultivado com videira submetida à adubação nitrogenada. *Ciência Rural*, Santa Maria, 42 (7):1173-1179.
- Lovarelli, D., Bacenetti, J., Fiala, M. (2016) Water Footprint of crop productions: A review. Università degli Studi di Milano, Milano, Italy. *Science of the Total Environment*. p. 236–251.
- Machado, C.F., Teixeira, N.J.P., Freire Filho, F.R., Rocha, M.M., Gomes, R.L.F. (2008) Identificação de genótipos de feijão-caupi quanto à precocidade, arquitetura da planta e produtividade de grãos. *Revista Ciência Agronômica*, 39: 114-123.
- Maia, A.J., Pereira, P.S., Rocha, D.G. da F., Távora, F.J.F., Barros, L.M. (2013) Efeito do estresse hídrico no crescimento de plantas de feijão de corda. *Enciclopédia Biosfera*, Centro Científico Conhecer - Goiânia, 9 (17):876.
- Malavolta, E., Vitti, G.C., Oliveira, S.A. de. (1997). Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed., *Piracicaba*: POTAFOS, SP, Brasil, 319 p.

- Martins, C.M., Martins, S.C.S., Borges, W.L. (2017) Correção da acidez, adubação e fixação biológica. In: do Vale, J.C., Bertini, C., Borém, A. (Ed.) *Feijão-caupi: do plantio à colheita*. Viçosa: UFV, cap. 5, p. 89-112.
- Matoso, A. de O., Soratto, R.P., Abrahão. R.C., Tirabassi, L.H., Rocha, M. de M. (2013) Avaliação de genótipos de feijão-caupi de porte ereto e semiereto na safrinha em Botucatu-SP. In: *CONGRESSO NACIONAL DE FEIJÃO-CAUPI (CONAC)*, 3, 2013, Recife. Resumos. Recife: Instituto Agrônômico de Pernambuco (IPA).
- Meira, A.L., Santana, T., Amorim, Y.F., Oliveira, L.M., Amaral, C.L.F., Miguel, D.L., Silva, J.O. (2016) Avaliação de cultivares de feijão-caupi submetidas a diferentes níveis de irrigação em ambiente protegido. In: *Convibra Agronomia*. 1:1-9.
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. (2010a) A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat, *Hydrology and Earth System Sciences*, 14:1259-1276.
- Melo, A.S. de, Melo, Y.L., Lacerda, C.F. de, Viégas, P.R.A., Ferraz, R.L. de S., Gheyi, H.R. (2022) Water restriction in cowpea plants [*Vigna unguiculata* (L.) Walp]: Metabolic changes and tolerance induction. *Rev. Bras. Eng. Agric. Ambiental*, 26 (3):190-197.
- Mendes, M.S., Távora, F.J.A.F., Pinho, J.L.N., Pitombeira, J.B. (2007) Relações fonte-dreno em feijão-de-corda submetido à deficiência hídrica. *Ciência Agrônômica*, 38:95-103.
- Mousa, M.A.A., Al Qurashi, A.D. (2018) Growth and yield of cowpea (*Vigna unguiculata* L.) cultivars under water deficit at different growth stages. *Legume Research*, Karnal, 41 (5):702-709.

- Nascimento, J.T., Pedrosa, M.B., Sobrinho, J.T. (2004) 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, 22 (2):174-177.
- Nascimento, S.P. do, Bastos, E.A., Araújo, E.C.E, Freire Filho, F.R., Silva, E.M. da (2011) Tolerância ao déficit hídrico em genótipos de feijão-caupi. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, PB, UAEA/UFPA. 15 (8):853-860.
- Nelson, D.L., Cox, M.M. (2014). Princípios de Bioquímica de Lehninger. 6a ed. *Porto Alegre: Artmed*. 1328p.
- Nogueira, R.J.M.C., Moraes, J.A.P.V., Burity, H.A., Bezerra Neto, E. (2001) Alterações na resistência à difusão de vapor das folhas e hídricas em aceroleiras submetidas a déficit de água. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, 13:75-87.
- Olsovska, K., Kovar, M., Brestic, M., Zivcak, M., Slamka, P., Shao, H.B. (2016) Genotypically identifying wheat mesophyll conductance regulation under progressive drought stress. *Frontiers Plant Science*, Lausanne, 7 (1111):1-14.
- Oliveira, I.P., Dantas, J.P. (1988) Nutrição mineral do caupi. In: Araujo, J.P.; Watt, E.E. O caupi no Brasil. Brasília: ITA/EMBRAPA, p.405-430.
- Oliveira, V.P.S. (1996) Avaliação do Sistema de Irrigação por Sulco da Fazenda do Alto em Campos dos Goytacazes - RJ. *Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal)* – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 26p.
- Oliveira, A.D., Fernandes, E.J., Rodrigues, T.J.D. (2005) Condutância estomática como indicador de estresse hídrico em Feijão. *Engenharia Agrícola*, 25:86-95.

- Oliveira, G.A., Araujo, F.W., Cruz, P.L.S., Silva, W.L.M., Ferreira, G.B. (2012) Resposta do feijão-caupi as lâminas de irrigação e as doses de fósforo no cerrado de Roraima. *Revista Ciência agrônômica*, 42 (4):872-882.
- Oliveira, I.J. de, Fontes, J.R.A., Silva, K.J.D.E., Rocha, M.M. (2014) BRS Marataoã – Cultivar de Feijão-Caupi com Grão Sempre Verde para o Amazonas. *EMBRAPA*, Manaus – AM. 1a ed. 1a impressão: 300. (Comunicado técnico) ISSN 1517-3887
- Oliveira, L.K.B. de (2020) Tolerância de cultivares de feijão-caupi ao déficit hídrico na fase germinativa: alterações fisiológicas, bioquímicas e citoquímicas. *Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia)* – Fortaleza - CE, Universidade Federal do Ceará, 103p.
- Osakabe, Y., Osakabe, K., Shinozaki, K., Tran, L.S.P. (2014) Response of plants to water stress. *Frontiers Plant Science*, Lausanne, 5 (86):1-8.
- Padulosi, S., NG, N.Q. (1997) Origin taxonomy, and morphology of *Vigna unguiculata* (L.) Walp. In: Singh, B.B., Mohan Raj, D.R., Dashiell, K.E., Jackai, L.E.N. (Ed.). *Advances in cowpea research*. Ibadan: International Institute of Tropical Agriculture; Tsukuba: Japan International Research Center for Agricultural Sciences. p. 1-12. Trabalhos selecionados do Second World Cowpea Research Conference, 1995, Accra, Ghana.
- Pereira Filho, J.V., Bezerra, F.M.L., Silva, T.C. da, Pereira, C.C.M. de S. (2017) Crescimento vegetativo do feijão-caupi cultivado sob salinidade e déficit hídrico. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 11 (8):2217-2228.
- Pimentel, C., Hébert, G. (1999) Potencial fotossintético e condutância estomática em espécies de feijão caupi sob deficiência hídrica. *Rev. Bras. Fisiol. Veg.*, 11: 7-11.
- Phogat, B.S., Singh, D.P., Singh, P. (1984) Responses of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) and mung bean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) to

- irrigation. II. Effects on CO₂ exchange, radiation characteristics and growth. *Irrigation Science*, New York, 5 (1):61-72.
- Ramírez, M.D.A., España, M., Lewandowska, S., Yuan, K., Okazaki, S., Ohkama-Ohtsu, N., Yokoyama, T. (2020) Phylogenetic Analysis of Symbiotic Bacteria Associated with Two *Vigna* Species under Different Agro-Ecological Conditions in Venezuela. *Microbes and Environments*. 35 (1):1-13.
- Raven, P.H., Eichhorn, S.E., Evert, R.F. (2014) *Biologia Vegetal*. 8ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan. Rio de Janeiro. 1637p.
- Resende, M., Henderson, D.W., Fereres, E. (1981) Frequência de irrigação e produção de feijão Kidney. *Pesquisa Agropecuária Bras.*, Brasília, 16 (3):363-370.
- Ringler, C., Bryan, E., Biswas, A. K., Cline, S.A. (2010) Water and food security under global Change. In: Ringler, C., Biswas, A.K., Cline, S.A. (Ed.). *Global change: impacts on water and food, water resources development and management*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, p.1-265.
- Ritchie, J.T. (1981) Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. *Plant and Soil*, 58:81-96.
- Rocha, W.S., Santos, M.G., Sakai, T.R.P., Silva, T.A., Fidelis, R.R., Santos, M.M. (2018a) Acúmulo de biomassa em função de doses de fósforo e inoculação de rizóbio em feijão-caupi. *Cultura Agrônômica*, 27 (2):273-286.
- Rocha, H.G. da S., Castro, H. de S., Freitas, J.R.B. (2019) Resposta de feijão-caupi à inoculação com estirpe de rizóbio. *Revista Mundi Meio Ambiente e Agrárias*. Paranaguá - PR, 4 (2):123-134.
- Rodrigues, E.V., Damasceno-Silva, K.J., Rocha, M. de M., Bastos, E.A.; Teodoro, P.E. (2017) Selection of cowpea populations tolerant to water deficit by selection index. *Revista Ciência Agrônômica*. 48:889-896.

- Sampaio, O.M., Silva, M.F. da G.F. da, Veiga, T.A.M., King-Díaz, B., Lotina-Hennsen, B. (2012) Avaliação de furanocumarinas como inibidores da fotossíntese através de ensaios de fluorescência da clorofila a. *Química Nova*. 35 (11):2115-2118.
- Santos, M.M. dos, Brito, V.F., Silva, E.M. da, Santos, M.G. dos, Barros, H.B., Lopes, M.B.S.L. (2019) Produtividade de feijoeiro-caupi cultivado com estirpes rizobianas e doses de fósforo. *Scientia Agraria Paranaensis*, Marechal Cândido Rondon, 18 (3):209-217.
- Santos, G.R. dos, Reis, H.B., Rotili, E.A., Mourão, D. de S.C., Farias, D.I.O.A. de, Pereira, T.A., Ferreira, T.P. de S., Chagas Junior, A.F. (2020) Inoculation of *Rhizobium* associated with *Trichoderma asperellum* on the development and yield of cowpea. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Recife, 15 (2):1-8.
- Sarr, P.S., Yamakawa, T., Saeki, Y., Guisse, A. (2011) Phylogenetic diversity of indigenous cowpea bradyrhizobia from soils in Japan based on sequence analysis of the 16S–23S rRNA internal transcribed spacer (ITS). *Syst Appl Microbiol* 34: 285-292.
- Satriani, A., Loperte, A., Soldovieri, F. (2015) Integrated geophysical techniques for sustainable management of water resource. A case study of local dry bean versus commercial common bean cultivars. *Agricultural Water Management*, 162:57-66.
- Scholander, P.F., Hammel, H.T., Hemingsen, E.A., Bradstreet, E.D. (1965) Hydrostatic pressure and osmotic potentials in leaves of mangroves and some other plants. *Proceedings of the National Academy Science*, 51:119-125.
- Siebert, S., Dóll, P. (2010) Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation, *Journal of Hydrology*, 384:198-207.

- Silva, A.C. da (2011) Características agronômicas e qualidade de sementes de feijão-caupi em Vitória da Conquista, Bahia. *Dissertação (Mestrado em Fitotecnia)* – Vitória da Conquista - BA, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, 87p.
- Silva, E.F. da, Barros Júnior, A.P., Silveira, L.M. da, Santana, F.M. de S., Santos, M.G. dos (2013) Avaliação de cultivares de feijão-caupi irrigado para produção de grãos verdes em Serra Talhada – PE. Universidade Federal Rural do Semi-Árido – Mossoró. *Revista Caatinga*, 26 (1):21-26.
- Silva, C.F. da, Loss, A., Carmo, E.R. do, Silva, E.M.R. da, Martins, M.A. (2015) Fertilidade do Solo e Substâncias Húmicas em Área de Cava de Extração de Argila Revegetada com Eucalipto e Leguminosas no Norte Fluminense. *Ciência Florestal*, 25 (3): 547-561.
- Silva, V. de P.R. da, Oliveira, S.D. de, Hoekstra, A.Y., Dantas Neto, J., Campos, J.H.B.C., Braga, C.C., Araújo, L.E. de, Aleixo, D. de O., Brito, J.I.B. de, Souza, M.D. de, Holanda, R.M. de (2016) Water Footprint and Virtual Water Trade of Brazil. *Water*, Basileia - Suíça, 9. nov. p.12.
- Silva, C. de F., Moura, M.F. de, Vilela, Á.R.R., Araújo, M.B. de, Marques, J.D. da S. (2019) Produção de feijão-caupi em função do emprego de inoculante e adubos orgânicos e mineral. *Diversitas Journal*. Santana do Ipanema-AL. 4 (3): 1130-1145.
- Silva, J. de S., Costa, R.S. da, Mesquita, R.O., Tomaz, F.L. de S., Bezerra, A.E., (2021) Mechanisms of tolerance to water defi cit and physiological responses to rehydration in cowpea. *Revista Ciência Agronômica*, 52 (3):1-10.
- Silva Júnior, E.B. da (2012) Avaliação da Fixação Biológica de Nitrogênio em Plantios Tecnificados de Feijão-Caupi na Região Centro-Oeste do Brasil. *Dissertação (Mestrado em ciência do solo)* – Seropédica - RJ, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 69p.

- Souza, C.C., Oliveira, F.A., Silva, I.F., Amorim Neto, M.S. (2000) Avaliação de métodos de determinação de água disponível e manejo da irrigação em terra roxa sob cultivo de algodoeiro herbáceo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 4 (1):338-342.
- Souza, M.A. de, Lima, M.D.B., Silva, M.V.V. da, Andrade, J.W. de S. (2009) Estresse hídrico e profundidade de incorporação do adubo afetando os componentes de rendimento do feijoeiro. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 39:175-182.
- Souza, S.A., Vieira, J.H., Farias, D.B. dos S., Silva, G.H. da, Aleman, C.C. (2020) Impact of Irrigation Frequency and Planting Density on Bean's Morpho-Physiological and Productive Traits. *Water*, 12:1-13.
- Stoilova, T., Pereira, G. (2013) Assessment of the genetic diversity in a germplasm collection of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) using morphological traits. *African Journal of Agricultural Research*, 8:208-215.
- Tagliaferre, C., Santos, T.J., Santos, L. da C., Santos Neto, I.J. dos, Rocha, F.A., Paula, A. de (2013) Características agronômicas do feijão caupi inoculado em função de lâminas de irrigação e de níveis de nitrogênio. *Rev. Ceres*, Viçosa, 60 (2):242-248.
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I.M., Murphy, A. (2017). *Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal*. 6a. ed. *Porto Alegre*, Artmed. 954p.
- Teixeira, I.R., Silva, G.C. da, Oliveira, J.P.R. de, Silva, A.G. da, Pelá, A. (2010) Desempenho agronômico e qualidade de sementes de cultivares de feijão-caupi na região do cerrado. *Revista Ciência Agronômica*, 41 (2):300-307.
- Tomaz, F.L. de S. (2020) Indicação de Cultivares de Feijão-caupi para Produção de Grãos Secos no Estado do Ceará. *Dissertação (Mestrado em Fitotecnia)* – Fortaleza - CE, Universidade Federal do Ceará, 49p.

- Turk, K.J., Hall, A.E. (1980) Drought Adaptation of Cowpea. II. Influence of Drought on Plant Water Status and Relation with Seed Yield. *Agronomy Journal*, 72: 421-427.
- Vanham, D. (2012) A holistic water balance of Austria — how does the quantitative proportion of urban water requirements relate to other users? *Water Sci Technol*, 66 (3):549–555.
- Vásquez, M.A. (2014) Efecto de concentraciones de fósforo, níquel y sílice en el crecimiento, nodulación y fijación simbiótica de N₂ en *Vigna unguiculata* (L.) Walp, *Vigna unguiculata ssp sesquipedalis* y *V. radiata*. PhD Thesis. Caracas, Venezuela: Graduate School of Sciences. Universidad Central de Venezuela. 74p.
- Vilhordo, B.W., Mikusinski, O.M.F., Burin, M.E., Gandolf, V.H. (1996) Morfologia. In: Araújo, R.S., Rava, C.A., Stone, L.F., Zimmermann, M.J.O. (eds). Cultura do feijoeiro: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba. *Associação Brasileira para pesquisa da potassa e do fosfato*, p. 669-700.
- Weatherley, P.E. (1950) Studies in the water relations of the cotton plant. I – The field measurements of water deficits in leaves. Oxford. *New Phytologist*, 49:81-97.
- WWAP - World Water Assessment Programme (2009). The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World, *UNESCO Publishing*, Paris and Earthscan, London.
- Zamperlini, G.P. (2010) Crescimento e desempenho fotoquímico do processo fotossintético em abacaxizeiro 'Vitória'. *Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal)* – Vitória - ES, Universidade Federal do Espírito Santo, 60p.
- Zwart, S.J., Bastiaanssen, W.G.M., Fraiture, C. de, Molden, D.J. (2010) A global benchmark map of water productivity for rainfed and irrigated wheat, *Agricultural Water Management*, 97 (10):1617-1627.

APÉNDICE

Tabela 1A. Resumo da análise de variância e coeficiente de variação para o comprimento da haste principal (CHP), comprimento do sistema radicular (CRZ), comprimento da nervura central de folíolos da folha D (CND), número total de folhas planta⁻¹ (NMF), diâmetro da haste principal (DHP), área foliar total (AFT), área foliar da folha D (AFD), massa fresca da parte aérea (MFA) e massa seca da parte aérea (MSA) de cultivares de feijão-caupi

FV	GL	Quadrado Médio									
		CHP	CRZ	CND	NMF	DHP	AFT	AFD	MFA	MSA	
Bloco	3	1980,67	120,47	7,7423	3,36	0,98	910934	21377,7	2106,7	22,08	
Cultivar (C)	2	6419*	135,35	2,854	14,145*	1,166	256926,5	1031	365,5	10,84	
Turno de Rega (TR)	3	46207,3*	363,97	10,121*	118,08*	7,1663*	2726648*	12237,3*	8224,7*	147,64*	
C x TR	6	4019,5*	264,1	0,587	6,062	0,1915	272536,8	1775,8	469,17	8,68	
Resíduo	33	1110,45	129,40	2,222	2,876	0,4625	154886	2651,8	436,12	6,56	
C.V. (%)		33,86	20,82	11,64	23,53	12,19	38,21	27,94	38,42	36,86	

FV = fonte de variação; GL= grau de liberdade; CV (%) = coeficiente de variação; * = significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 2A. Resumo da análise de variância e coeficiente de variação para o teor de clorofila total na pré (SPAD_a) e pós-irrigação (SPAD_p), pressão aplicada na antemanhã (PA_{am}) e ao meio-dia (PA_{md}), rendimento quântico máximo do fotossistema II na pré (Fv/Fm_a) e pós-irrigação (Fv/Fm_p), índice de desempenho fotoquímico na pré (Plabs_a) e pós-irrigação (Plabs_p), condutância estomática na pré (CE_a) e na pós-irrigação (CE_p) de cultivares de feijão-caupi

FV	GL	Quadrado Médio									
		SPAD _a	SPAD _p	PA _{am}	PA _{md}	Fv/Fm _a	Fv/Fm _p	Plabs _a	Plabs _p	CE _a	CE _p
Bloco	3	0,337	18,557	1,508	0,9417	0,001002	0,00137	6,2913	3,7353	164,06	1538,7
Cultivar (C)	2	6,415	2,52	0,457	0,209	0,0000385	0,00349*	4,993	8,678*	177,05	9892,5
Turno de Rega (TR)	3	60,847	42,507	3,7103*	0,8133	0,003381	0,00112	13,879*	17,177*	94,13	1194
C x TR	6	48,893	52,622	0,5713	0,8588	0,000463	0,00073	7,096	3,792	49,10	3399,7
Resíduo	33	21,104	23,922	0,7995	0,6809	0,001205	0,001016	4,2083	2,1182	83,27	3100
C.V. (%)		9,19	9,83	48,54	54,38	4,59	4,24	36,01	32,77	29,13	50,58

FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; CV (%) = coeficiente de variação; * = significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 3A. Resumo da análise de variância e coeficiente de variação para o número de vagens por planta (NVP), número total de grãos por planta (NTG), massa total de grãos por planta (MTG), massa seca total de grãos por planta (MSG), massa de cem grãos (M100), teor de N amoniacal na semente (TNS), teor de N amoniacal na parte aérea (TNA) e pegada hídrica azul (PHA) de cultivares de feijão-caupi

	FV	GL	Quadrado Médio							
			NVP	NTG	MTG	MSG	M100	TNS	TNA	PHA
Bloco	3	3,222	109,233	1,55	1,896	1,008717	12,794	88,65	282868.7	
Cultivar (C)	2	6,771	1452,05*	53,58*	37,735*	10,20124	6,0755	191,63*	2616640.0*	
Turno de Rega (TR)	3	2,889	121,73	2,637	2,9513	1,781798	13,877*	135,79*	793882.4	
C x TR	6	3,076	260,783	6,588	5,2812	9,054153	5,475	15,61	740558.3	
Resíduo	33	2,7979	175,288	4,949	3,859	5,385503	4,3946	36,94	506731.7	
C.V. (%)		28,68	23,36	21,52	21,48	12,55	5,45	14,72	22,08	

FV = fonte de variação; GL = grau de liberdade; CV (%) = coeficiente de variação; * = significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.



Figura 1A. Plantas de feijão-caupi aos 4 dias após a semeadura (DAS, A), 6 DAS (B), 8 DAS (C), 14 DAS (D, quando iniciaram os turnos de rega), 31 DAS (E) e 41 DAS (F).

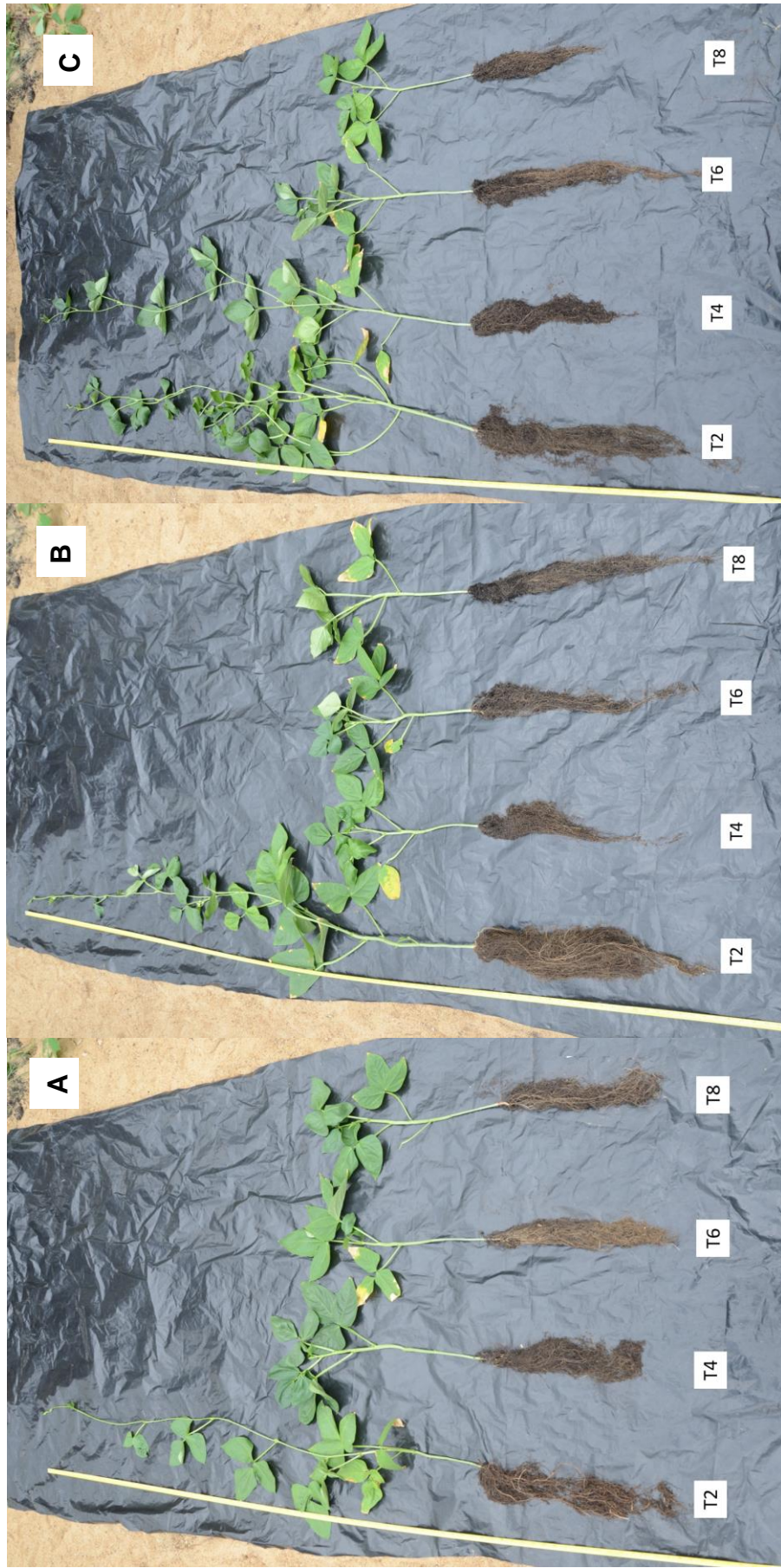


Figura 2A. Plantas de feijão-caupi da cv. BRS Pajeú (A), BRS Marataoã (B) e BRS Rouxinol (C) aos 51 DAS, após aplicação dos turnos de rega de 2 dias (T2), 4 dias (T4), 6 dias (T6) e 8 dias (T8).



Figura 3A. Vagens de feijão-caupi da cv. BRS Pajeú produzidas após aplicação do turno de rega de 2 dias (A), 4 dias (B), 6 dias (C) e 8 dias (D).

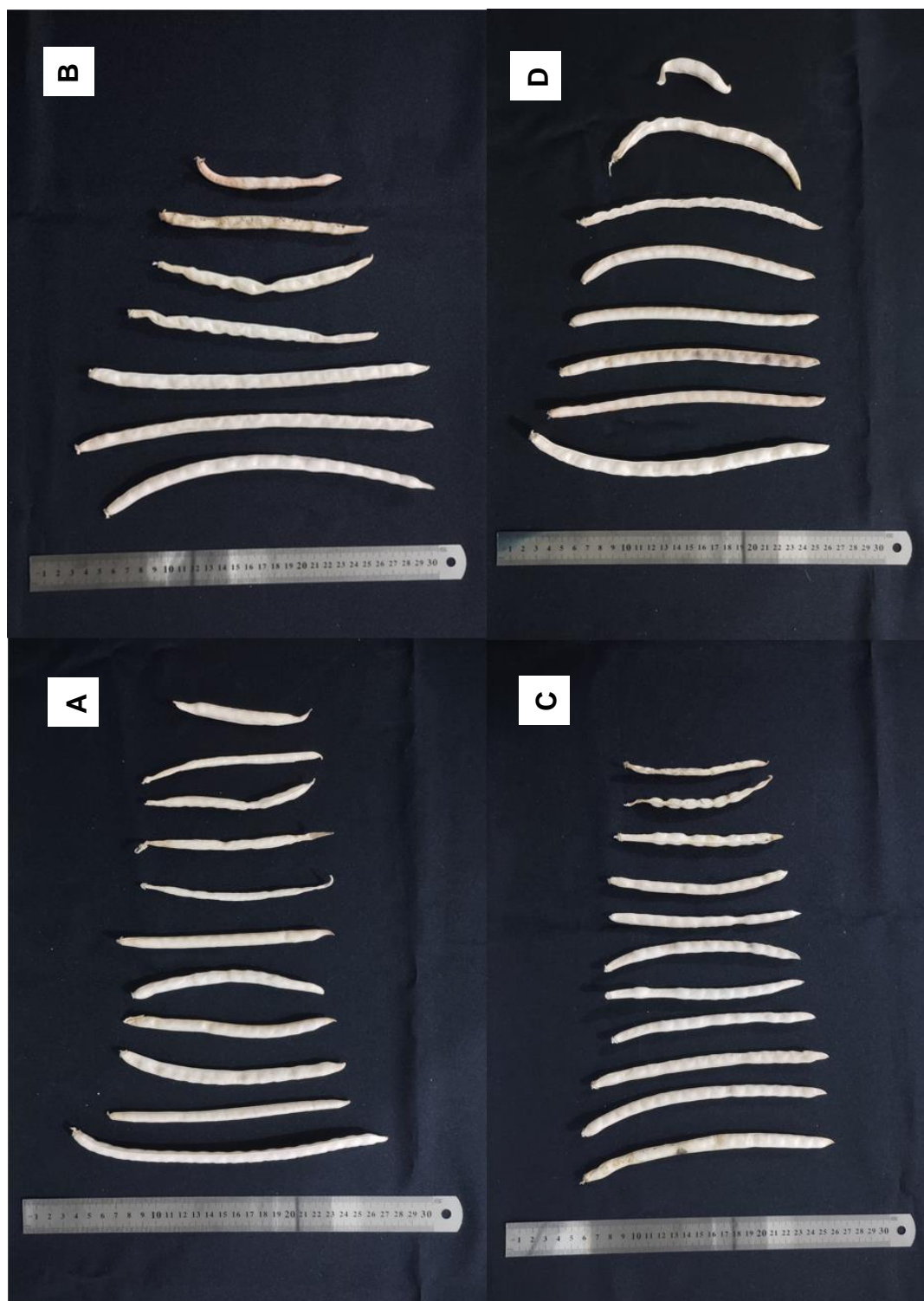


Figura 4A. Vagens de feijão-caupi da cv. BRS Marataoã produzidas após aplicação do turno de rega de 2 dias (A), 4 dias (B), 6 dias (C) e 8 dias (D).



Figura 5A. Vagens de feijão-caupi da cv. BRS Rouxinol produzidas após aplicação do turno de rega de 2 dias (A), 4 dias (B), 6 dias (C) e 8 dias (D).



Figura 6A. Implantação do experimento (A, B), medição do volume de água percolada após a rega (C), coleta de dados para as avaliações fisiológicas aos 38 DAS (D), medições com os aparelhos fluorímetro (E), porômetro (F) e clorofilômetro (G).

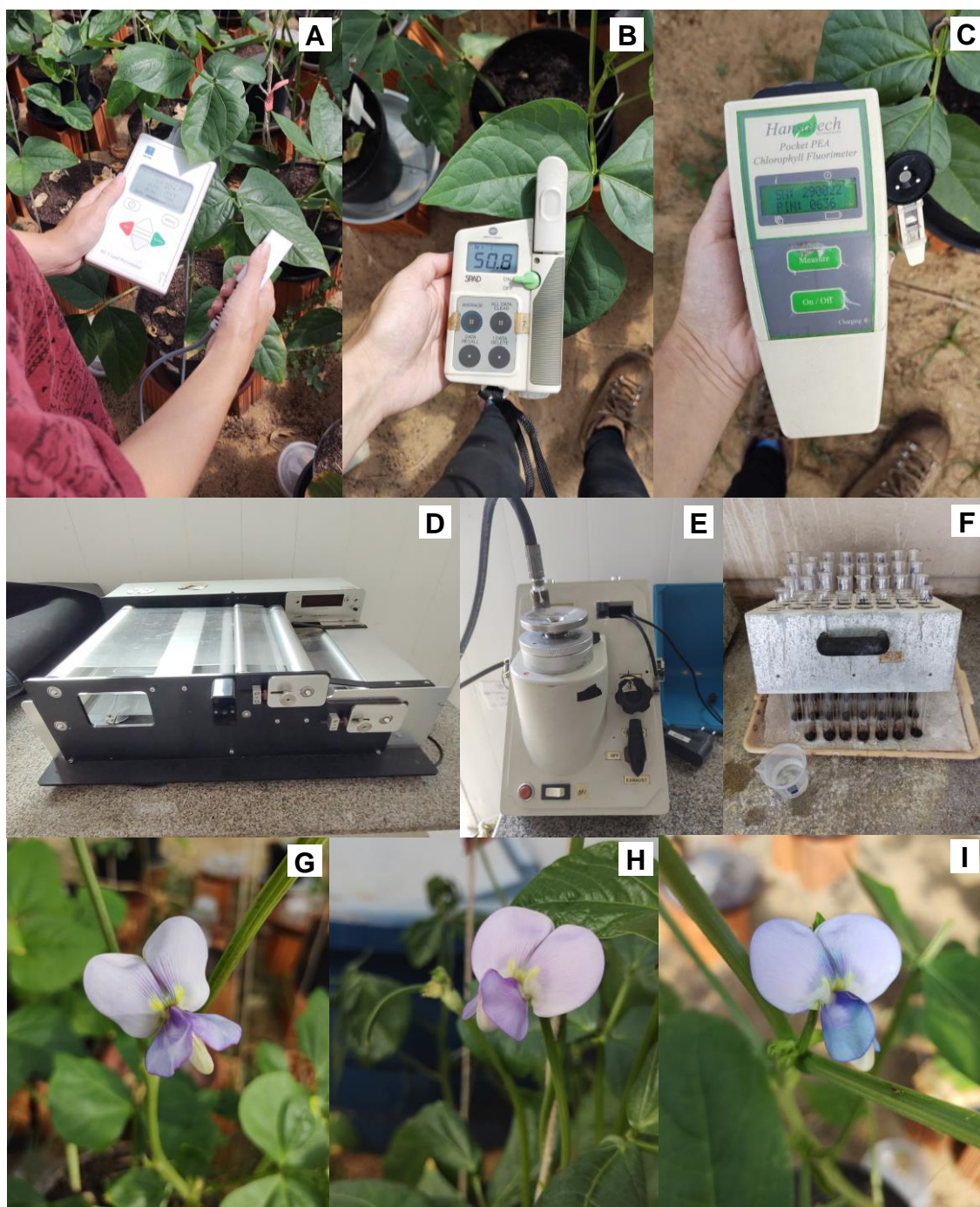


Figura 7A. Porômetro “SC-1 Leaf Porometer” Decagon Devices (A), Clorofilômetro “Soil Plant Analysis Development”, conhecido como SPAD-502 (Minolta, Japão) (B), Fluorímetro Pocket PEA “Plant Efficiency Analyser” (Hansatech, Inglaterra) (C), medidor eletrônico de área foliar LICOR modelo LI-3100C (D), Câmara de Pressão de Scholander (E), digestão sulfúrica para determinação do teor de N amoniacal presente nas amostras da parte aérea das plantas de feijão-caupi coletadas aos 52 DAS e das sementes de feijão-caupi produzidas (F), flor da cultivar BRS Pajeú aos 42 DAS (G), flor da cultivar BRS Marataoã aos 45 DAS (H), flor da cultivar BRS Rouxinol aos 48 DAS (I).