



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

VANDEILSON BELFORT MOURA

**REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO, EVAPOTRANSPIRAÇÃO E
FATORES DE RESPOSTA DO FEIJÃO-CAUPI SUBMETIDO A DISTINTAS
LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO NO NORDESTE PARAENSE**

BELÉM – PA

2019



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

VANDEILSON BELFORT MOURA

**REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO, EVAPOTRANSPIRAÇÃO E
FATORES DE RESPOSTA DO FEIJÃO-CAUPI SUBMETIDO A DISTINTAS
LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO NO NORDESTE PARAENSE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Mestre.
Orientador: Prof. Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza.

BELÉM – PA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na
Publicação (CIP) Bibliotecas da Universidade
Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Moura, Vandeilson Belfort

Reflectometria no domínio do tempo, evapotranspiração e fatores de resposta do feijão-caupi submetido a distintas lâminas de irrigação no Nordeste Paraense / Vandeilson Belfort Moura . - 2019.

99 f.

Dissertação (Mestrado) - Programa de pós-graduação em Agronomia(PPGA), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza

1. Feijão-caupi - Amazônia. 2. Feijão-caupi - produtividade. 3. *Vigna unguiculata* (L.) Walp. 4. Déficit hídrico. 5. Balanço hídrico. I. Souza, Paulo Jorge de Oliveira Ponte de, orient.
II. Título

CDD: 633.3

VANDEILSON BELFORT MOURA

**REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO, EVAPOTRANSPIRAÇÃO E
FATORES DE RESPOSTA DO FEIJÃO-CAUPI SUBMETIDO A DISTINTAS
LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO NO NORDESTE PARAENSE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza (Presidente)
Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA



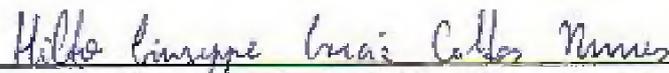
Prof. Dr. Rodrigo Otávio Rodrigues de Melo Souza (Primeiro Examinador)

Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA



Pesq. Dr. Alaison Venceslau Santiago (Segundo Examinador)

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA



Dr. Hildo Giuseppe Garcia Caldas Nunes (Terceiro Examinador)

Meteorologista

AGRADECIMENTOS

Esse capítulo da minha história, eu não construí só, por isso sinceramente agradeço:

Especialmente ao meu Deus que a cada dia me levanta para o combate, e faz-me acreditar que o impossível, é possível!

A minha Família, que eu tanto amo, pelo apoio, dedicação, reconhecimento e carinho eterno, sendo sempre meu porto seguro e minha fonte de inspiração em busca do melhor.

Ao Governo Federal, a Universidade Federal Rural da Amazônia, ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, as coordenadoras Prof.^a Gisele Barata e Herdjania Lima, ao corpo docente Hugo Pinheiro, Sueli Rodrigues, Joaquim Alves, Rodrigo Souza, Rodrigo Silva, Steel Vasconcelos, Lurdes Ruivo, Alessandro Carioca, Pedro Campos, Paulo Libardi, Edson Marcos, Edna Souza, Everaldo Barreiros, Tasso Guimarães e ao meu grande Professor Paulo Jorge que com Maestria provocaram grandes mudanças na minha vida profissional durante a realização do mestrado.

A banca do Exame de Qualificação e de Defesa Vivian, Joaquim, Michel, Rodrigo, Alailson e Hildo (Garibaldi) que de forma humilde e técnica, colaboraram nessa dissertação.

Ao Grupo ISPAAM e aos discentes do PGAGRO que me recebeu desde o dia 05/03/2017 e foram meu alicerce em cada passo no mundo e submundo da Pós-graduação e da Agrometeorologia: Denis, Deborah, Garibaldi, Vivian, Denilson, João Vitor, Daniely, Fernanda, Marcus, Grasiela, Thaynara, Bruna, Érika, Igor, Matheus, Lucas Belém, Jaime, Ewelyn, Bruno, Bianca e os demais pela amizade, força de trabalho e capacidade profissional durante nossa dedicação à ciência, que além de colegas de profissão, tornaram-se meus amigos.

A Fazenda Escola de Castanhal: Eng. Agrônomo Raimundinho, Lene, Maradona, Dona Andréa, Gilson, Daércio, Fernando, Nairo, Maciel, Erikvan, Cledson, Mica e Renato pela amizade, convivência e grande apoio nas atividades de campo e na estadia.

A AITA SERVIÇOS DE ENGENHARIA: a minha amiga Eliana Oliveira que me abrigou em sua casa durante o mestrado e me deu total apoio para que pudesse cumpri-lo, e também ao Júnior, Lene, Renata, Vanessa, Saulo, Alejandra, Wanderley, Pedro, Wilma, Márcia, Letícia, Emerson, Felipe, Laura, Elizy, Fernando, Dona Luzia, Eliete, Luciana, Leonardo, Cicleide, Fabio e Carlos. Obrigado pela confiança, admiração, carinho e o respeito que conquistei de todos vocês!

Ao apoio essencial dos meus amigos e eterna diretora da UFRA Parauapebas Kaliandra Alves e Luis Renan que em nome deles, agradeço a todos os funcionários da UFRA que trabalhei durante 6 anos da minha vida. Sem vocês, seria impossível!

Aos meus amigos pelo apoio em todos os momentos: Wslena, Nayara, Joyse Tatiane, Tiago, Rozilda, Juliana, Welliton, Helane, Socorro, Gisele, Sheila, Yanna, Renata, Antônia, Williana, Iran, Uelitânia, Francilma, Wendelo, Luana, Rogério, Dany, Laine, Valdir, Weberson, Luciana, Natália, Perlton, Adriana, Rafael Mezzomo, Kely, Juan, Lucivania, Wagno, Renatinha, Joel, Claudia, Weliton, Marisa, Wagner.

Ao meu orientador e minha referência na ciência, Prof. Dr. Paulo Jorge pela orientação, ensinamentos, respeito, amizade, competência, paciência, confiança e profissionalismo. Obrigado por ter me escolhido! Devo muito ao senhor PJ, Muito Obrigado!

Vandeilson Belfort Moura
Solstício de Verão

Dedico,

Aos meus pais,

Valdeci Belfort Moura & José Moura Filho,
Por todos os ensinamentos, incentivos para estudar
e crescer profissionalmente, com responsabilidade,
dignidade e muito trabalho, sem deixar faltar
carinho e amor durante todos os anos da minha vida.

As minhas irmãs

Wandeilma, Vandejane e Elzi
sobrinhas, sobrinhos, tios, tias, primos, primas e agregados.

A

Kaliandra Alves e Eliana Gonçalves
Por toda torcida, companheirismo, amor, carinho e amizade.

A

Todos que me respeitaram como
pessoa e profissional e que compartilharam comigo
os momentos na busca pelo saber!

Ofereço,

A

Deus autor e consumidor da minha fé
Ao ISPAAM,
Na pessoa do Prof. Dr. Paulo Jorge!

“O coração do homem traça o seu caminho,
Mas *Deus é quem determina aonde devemos chegar*”
Provérbios 16:9.

SUMÁRIO

RESUMO	10
ABSTRACT	11
1 CONTEXTUALIZAÇÃO	12
1.1 Revisão de literatura	16
1.1.1 Importância socioeconômica, histórico-cultural e ambiental do feijão-caupi.....	16
1.1.2 Botânica e condições edafoclimáticas	19
1.1.3 Valor nutricional do grão	20
1.1.4 Cultivar BR3-Tracuateua	21
1.1.5 Ciclo Fenológico	22
1.1.6 Reflectometria no domínio do tempo e o monitoramento da água no solo.....	22
1.1.7 Irrigação no Brasil e no Pará	27
1.1.8 Balanço hídrico no solo.....	30
1.1.9 Evapotranspiração	33
1.1.10 Estresse hídrico	34
1.1.11 Fatores de Resposta K_y e K_{ss}	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
2 CALIBRAÇÃO E ESTIMATIVA DA UMIDADE EM UM LATOSSOLO AMARELO DISTRÓFICO PELA TIME DOMAIN REFLECTOMETRY NA AMAZÔNIA.	54
RESUMO	54
2.1 INTRODUÇÃO	54
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	56

2.2.1 Área experimental e características do solo.....	56
2.2.2 Calibração pelo método gravimétrico	58
2.2.3 Avaliação dos modelos	61
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
2.4 CONCLUSÃO	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL E FATOR DE RESPOSTA DO FEIJÃO-CAUPI AO DÉFICIT HÍDRICO NA FASE REPRODUTIVA NO NORDESTE PARAENSE	77
RESUMO.....	77
ABSTRACT	77
3.1 INTRODUÇÃO.....	78
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	79
3.2.1 Localização e caracterização	79
3.2.2 Manejo da cultura	82
3.2.3 Delineamento experimental.....	83
3.2.4 Cálculos	85
3.2.5 Análise dos dados	91
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	92
3.4 CONCLUSÃO	100
LITERATURA CITADA.....	100

RESUMO

A análise da produtividade, os efeitos e viabilidade da irrigação e das condições climáticas sobre o feijão-caupi na Amazônia são estudos necessários para otimizar a produção no Estado do Pará, a fim de, se conhecer os impactos que a redução da evapotranspiração (ET) compreendida pela transferência de vapor d'água para atmosfera tanto da superfície do solo quanto da transpiração das plantas pode causar no crescimento e desenvolvimento da cultura. A estimativa da ET através do método do balanço hídrico, exige o conhecimento da variação do armazenamento da água no solo em um determinado volume de solo que dentre os métodos adotados no monitoramento está a Time domain reflectometry (TDR). Tendo em vista, a influência de variáveis físicas e químicas do solo no processo de medição da água pela tecnologia, as leituras da constante dielétrica aparente do solo (K_a) podem levar a estimativas inadequadas da umidade volumétrica de água no solo (θ) com a técnica da TDR em sub ou superestimativas. Assim, objetivou-se determinar e avaliar modelos de calibração de estimativa da umidade volumétrica de água em um Latossolo Amarelo Distrófico de Castanhal (PA) pela Time Domain Reflectometry através de amostras indeformadas e pelo método gravimétrico com ajuste de equações, assim como a comparação com curvas de calibração consideradas referência na literatura inseridas e recomendadas em sensores de umidade do solo. Após a calibração e ajuste dos dados de θ , objetivou-se estimar a evapotranspiração da cultura (ET_c), real (ET_r) e avaliar o cultivo do feijão-caupi submetido a distintas lâminas de irrigação e seus efeitos nos estádios fenológicos sobre o fator de resposta da produção (K_y) e da biomassa seca (K_{ss}) nas condições edafoclimáticas do Nordeste paraense pelo método do balanço hídrico simplificado com experimento em blocos ao acaso, composto de seis repetições e quatro tratamentos de restauração da ET_c : T1 (100% ET_c), T2 (50% ET_c), T3 (25% ET_c) e T4 (0% ET_c), iniciados na fase reprodutiva da cultivar BR3-Tracueteua. Os ajustes linear e polinomial cúbico apresentaram as melhores avaliações de desempenho de estimativa da θ no solo estudado a partir dos valores obtidos pelo método gravimétrico, sendo as equações da fabricante do sensor CS616 inadequadas, pois subestimaram os valores da K_a . Todos os modelos da literatura apresentaram superestimativas dos valores de θ , a partir dos valores gravimétricos. O feijão-caupi apresentou uma ET total de 337.5; 284.35; 258.62 e 219.82 mm com um consumo médio 4.6, 3.90, 3.54 e 3.01 mm dia⁻¹ para T1, T2, T3 e T4. As quedas no rendimento do grão foram de 18.91, 33.12 e 57.17 % para T2, T3 e T4, respectivamente, tendo diferença significativa na produtividade de grãos entre todos os tratamentos pelo teste de tukey ($P < 0,05$). O estágio de floração foi o que apresentou a maior demanda hídrica com 5,88 mm dia⁻¹ e a maior sensibilidade ao déficit hídrico quantificado pelo fator de resposta da biomassa seca (K_{ss}). Tanto os K_y quanto o K_{ss} apresentaram aumento na medida da severidade da restrição hídrica imposta pelas condições ambientais e os tratamentos. O feijão-caupi apresentou um K_y de 1,48 e o K_{ss} de 2.03, 1.08 e 0.87 para os estádios de floração, enchimento de grãos e maturação fisiológica, indicando que a planta possui alta sensibilidade ao déficit hídrico nas condições climáticas do Nordeste paraense.

Palavras-chave: Feijão-caupi - Amazônia. Feijão-caupi - produtividade. *Vigna unguiculata* (L.) Walp. Déficit hídrico. Balanço hídrico.

ABSTRACT

The analysis of productivity, effects and viability of irrigation and climatic conditions on cowpea in the Amazon are studies necessary to optimize production in the State of Pará, in order to know the impacts that the reduction of evapotranspiration (ET) understood by the transfer of water vapor into the atmosphere from both the soil surface and the transpiration of the plants can cause the growth and development of the crop. The estimation of ET by means of the water balance method requires knowledge of the variation of soil water storage in a given volume of soil that among the methods adopted in the monitoring is Time domain reflectometry (TDR). Considering the influence of soil physical and chemical variables on the process of water measurement by technology, the readings of the apparent dielectric constant of the soil (K_a) can lead to inadequate estimates of the volumetric moisture of the soil (θ) TDR technique in sub or overestimations. The objective of this study was to determine and evaluate calibration models for the estimation of water volumetric moisture in a Castanhal Yellow Latosol (PA) by Time Domain Reflectometry using undisturbed samples and by the gravimetric method with equation adjustment, as well as the comparison with calibration curves considered reference in the literature inserted and recommended in soil moisture sensors. After the calibration and adjustment of the θ data, the objective was to estimate the evapotranspiration of the (ET_c), real (ET_r) and to evaluate the cultivation of the cowpea submitted to different irrigation slides and their effects on the phenological stages on the (K_{ss}) in the edaphoclimatic conditions of Northeast of Paraense by the simplified water balance method with a randomized block experiment, composed of six replicates and four ET_c restoration treatments: T1 (100% ET_c), T2 (50% ET_c), T3 (25% ET_c) and T4 (0% ET_c), started in the reproductive phase of cultivar BR3-Tracuateua. The linear and cubic polynomial adjustments showed the best estimates of θ estimation performance in the studied soil from the values obtained by the gravimetric method, and the CS616 sensor manufacturer's equations were inadequate, as they underestimated the K_a values. All the models of the literature presented overestimations of the values of θ , from the gravimetric values. Cowpea had a total ET of 337.5; 284.35; 258.62 and 219.82 mm with a mean consumption of 4.6, 3.90, 3.54 and 3.01 mm day⁻¹ for T1, T2, T3 and T4. The grain yield declines were 18.91, 33.12 and 57.17% for T2, T3 and T4, respectively, with a significant difference in grain yield among all treatments by the tukey test ($P < 0.05$). The flowering stage presented the highest water demand with 5.88 mm day⁻¹ and the highest sensitivity to the water deficit quantified by the dry matter response factor (K_{ss}). Both K_y and K_{ss} showed an increase in the severity of the water restriction imposed by environmental conditions and treatments. Cowpea had a K_y of 1.48 and K_{ss} of 2.03, 1.08 and 0.87 for the stages of flowering, grain filling and physiological maturation, indicating that the plant has a high sensitivity to the water deficit in the climatic conditions of the Northeast of Pará.

Key words: Cowpea bean - Amazon. Cowpea beans - productivity. *Vigna unguiculata* (L.) Walp. Water deficit. Hydric balance.

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A produção brasileira de grãos para a safra 2017/18 está estimada em 229,53 milhões de toneladas, com incremento de 0,6% na área de plantio, atingindo 61 milhões de hectares (CONAB, 2018) onde o feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) tem apresentado desde o ano de 2010 a 2017 aumento no rendimento médio de 678 para 821 kg ha⁻¹, embora tenha ocorrido diminuição da área colhida de 53.793 para 33.596 ha e da produção de 36.498 para 27.579 t no Pará (SEDAP, 2017).

A comercialização do feijão-caupi como semente e grão pela agricultura familiar e o agronegócio no Brasil é realizada em quinze Estados, sendo a região nordeste a maior produtora (385,1 t), seguida do centro-oeste (226,5 t), norte (94,3 t) e sudeste (7,4 t), onde o Estado do Mato Grosso é o maior produtor com 222 t. O Estado do Pará ocupa a 7ª posição da produção nacional do feijão-caupi (24,4 t) e aparece somente no mapa da terceira safra com janela de semeadura (maio a julho) e colheita (agosto a outubro) com preço no valor de R\$ 50,00 a saca de 60 kg (CONAB, 2018).

O Pará apresenta a segunda maior produtividade média de 866 kg ha⁻¹ (14,4 sc ha⁻¹) na safra 2016/17 e a maior área plantada (28,2 ha) do Brasil e da Região Norte na terceira safra, seguido do Tocantins (15 ha) e Roraima (2,4 ha) que apresentam produtividade média de 2.060 kg ha⁻¹ e 650 kg ha⁻¹, respectivamente. Nas regiões centro-oeste e centro-sul com somente uma área de 0,3 ha, a produtividade é de 1.500 kg ha⁻¹ e na região Nordeste é de 466 kg ha⁻¹. Os municípios de Tracuateua (2.700 t), Santana do Araguaia (2.300 t), Capanema (1.700 t), Capitão Poço (1.400 t), Augusto Corrêa (1.170 t), Viseu (1.170 t), Trairão (811 t), Bragança (810 t), Itaituba (776 t), Ipixuna do Pará (750 t) são os maiores produtores do feijão-caupi no Estado (SEDAP, 2017; CONAB, 2018).

O cultivo de sequeiro limita a produção do feijão-caupi, onde no Pará somente 103.352 ha são irrigados, sendo 50,70 % por métodos tradicionais e/ou molhamento: mangueiras, baldes, regadores, latões dentre outros, com 42 % das propriedades agrícolas irrigadas só no Nordeste paraense devido as condições climáticas, processo histórico de ocupação e agricultura intensiva com vários sistemas produtivos que exigem sistemas de irrigação, porém o fato alarmante é que 81,31 % das propriedades agrícolas com irrigação não recebem assistência técnica no Pará (COSTA FILHA, 2005; SOUZA et al., 2012; IBGE, 2017).

O nordeste paraense é considerado o polo produtivo do feijão-caupi compreendido pelos municípios de Capanema, Tracuateua, Bragança, Capitão Poço, Augusto Corrêa, São Miguel do Guamá e Ipixuna do Pará, o que aliado além do forte trabalho dos produtores, as parcerias com os centros de pesquisa que fornecem cultivares adaptadas às diversas condições ambientais da região, mais produtivas, resistentes a pragas, doenças que são indispensáveis. Porém, além de um bom material genético, faz-se necessário práticas que permitam a planta expressar seu potencial produtivo, que pode ir além dos 821 kg ha⁻¹ de feijão-caupi no Pará (FREIRE FILHO et al., 2009; SANTOS E REBELLO, 2012; SEDAP, 2017). Segundo ANA (2017), a produção do feijão irrigado apresenta rendimentos 2,5 vezes superiores aos da produção de sequeiro.

A alta sensibilidade do feijoeiro ao déficit hídrico no solo aliada às incertezas climáticas, determinam também os baixos rendimentos e a oscilação anual da produção do feijão-caupi resultantes do sistema de produção, uso de sementes não melhoradas, solos de baixa fertilidade e condições de mercado e política econômica, sendo fundamental o planejamento da produção (CARDOSO et al., 1995; ANDRADE JÚNIOR, 2000; REBELLO et al., 2010; SABOYA, et al., 2013).

Como o plantio é restrito ao primeiro semestre do ano que é mais chuvoso, a produção irrigada é estratégica para a oferta do produto no segundo semestre que é menos chuvoso e com temperaturas do ar mais elevadas, onde ainda são necessárias informações técnicas que auxiliem no planejamento, dimensionamento e gerenciamento do manejo adequado da irrigação, dando suporte aos produtores, impulsionando o cultivo do feijão-caupi irrigado não só na mesorregião Nordeste, mas em todo Estado do Pará com riscos mínimos e produção planejada para todo o ano (REBELLO et al., 2010).

Cultivada em regiões úmidas, subúmidas e semiáridas com excelente adaptação à seca, sendo essa capacidade de adaptação do feijão-caupi variável dentro da espécie e nos seus estádios fenológicos, preconizam que para o manejo adequado da cultura, visando elevada produtividade, o conhecimento da capacidade de respostas da planta a diferentes níveis de déficit hídrico, bem como a relação entre o consumo de água e produtividade é necessário (NASCIMENTO et al., 2004). Segundo Azevedo et al. (2011) o rendimento do feijão-caupi é afetado com maior ou menor intensidade em função da duração e da época de ocorrência da deficiência hídrica.

A sensibilidade da planta ao déficit hídrico pode ser verificada pelo estudo das etapas de desenvolvimento de maior consumo e os períodos críticos, quando a falta ou excesso de água resulta em quedas na produção (BERNARDO, 1989), sendo que a demanda hídrica do feijão-

caupi varia de um valor mínimo na germinação até um valor máximo na floração e na formação de vagens, decrescendo a partir do início da maturação (NÓBREGA et al., 2001).

O fator de resposta da produção (Ky) proposto por Doorenbos e Kassam (1979) no boletim da FAO 33 é um coeficiente adimensional que permite pela relação entre a queda do rendimento relativo com déficit de evapotranspiração relativa, conhecer os efeitos de um determinado nível de déficit hídrico sobre a produção de uma cultura. Já o fator de resposta da biomassa seca (Kss) por analogia, permite-se conhecer quais as etapas fenológicas da planta são mais sensíveis a níveis de déficit hídrico em uma condição climática durante seu cultivo, através da correlação entre a perda relativa de matéria seca pelo déficit de evapotranspiração relativa da planta (PATENÈ et al., 2011).

Os fatores de resposta Ky e Kss para Steduto et al. (2012) captam a essência das ligações complexas entre produção e uso de água, onde diversos processos biológicos, físicos e químicos estão envolvidos. Segundo Cardoso et al. (2000) a temperatura do ar e a precipitação são os fatores climáticos que mais influenciam no comportamento do feijão-caupi, onde a deficiência hídrica afeta sensivelmente a germinação, o estabelecimento da cultura, podendo paralisar o crescimento e retardar o desenvolvimento da planta devido ao fechamento estomático e a redução da absorção de CO₂ no mesófilo foliar (CHAVES et al., 2002).

Para Ribeiro et al. (2008) o aumento da intensidade do estresse, promove alterações metabólicas na planta pela diminuição da absorção de nutrientes minerais (GONZALEZ et al., 2010) e redução do crescimento celular (CHAVES et al., 2009). Segundo Kramer (1983) a falta de água promove redução na fotossíntese, translocação de carboidratos, reguladores de crescimento com distúrbios no metabolismo do nitrogênio.

Doorenbos e Kassam (1994) determinaram o Ky de 1,15 para o rendimento do feijão comum e para os estádios fenológicos vegetativo, floração, formação de vagens e amadurecimento de 0,2, 1,1, 0,75 e 0,2 respectivamente, sendo considerada uma planta muito sensível ao déficit hídrico com destaque para a fase de floração. Porém, não há estimativas de Ky e Kss para o feijão-caupi pela FAO 33. Kaboosi e Kaveh (2010) sugerem que o Ky seja determinado para condições específicas em que serão utilizados devido a variação das condições edafoclimáticas.

Assim, trabalhos a respeito do desenvolvimento da planta e produtividade em função da aplicação de distintas lâminas de irrigação sobre os fatores de resposta com o feijão-caupi no Brasil foram realizados por Cordeiro et al. (1998) no Ceará, Carvalho et al. (2000) em Lavras-MG e Mousinho et al. (2008) no Piauí, sendo que não há nenhum estudo sobre o efeito de

distintas lâminas de irrigação sobre os fatores de resposta do feijão-caupi nas condições edafoclimáticas da Amazônia brasileira.

O método do balanço hídrico de água no solo vem sendo utilizado para estimar a evapotranspiração do feijão-caupi para que se possa obter o coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico como nos trabalhos de Cordeiro et al. (1998), Carvalho et al. (2000) e Mousinho et al. (2008), sendo que nenhum desses realizou monitoramento da água no solo com a reflectometria no domínio do tempo (TDR).

Cordeiro et al. (1998) em condições de campo, usando sistema de irrigação por aspersão, tensiômetro e uma lâmina reduzida de 50% em relação a testemunha sem déficit em todas as fases fenológicas do caupi, concluíram que o estágio de enchimento de grãos foi o mais sensível ao déficit hídrico, sendo os valores do fator de resposta ou coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (K_y) inferiores a 1, indicando baixa sensibilidade ao estresse hídrico.

Carvalho et al. (2000) em casa de vegetação cultivando o feijão-caupi em vasos de 14 litros com reposição de água por proveta de 80, 60, 40, 20 e 0 % em relação à evapotranspiração da testemunha, encontraram quedas de rendimento que variaram de 35 a 100 % na fase de crescimento, 34 a 81 % na fase de floração e de 32 a 73 % na frutificação, relativos aos níveis de 80 e 20 % de água consumida, respectivamente, em relação a testemunha, e os valores de K_y de 1.28; 1.05 e 0,98 para as fases de crescimento, floração e frutificação, sendo sensível ao déficit hídrico.

Segundo Steduto et al. (2012) os estágios de floração e produção são mais sensíveis ao estresse. Já nas fases de maturação e vegetativa o impacto é limitado, desde que a cultura seja capaz de se recuperar do estresse nos estágios subsequentes. Para Allen et al. (1998) geralmente a diminuição no rendimento devido ao déficit hídrico durante o período vegetativo e de maturação é relativamente pequeno, enquanto que durante a floração e formação do grão será grande.

Para EMBRAPA (2018) se houver falta de água no período do florescimento ao enchimento de grãos, a produtividade de grãos pode ser reduzida em até 80 %, que aliada a temperaturas superiores a 34 °C, podem provocar o abortamento das flores e redução na produtividade de vagens e grãos. Para Souza et al. (2011), somente o conhecimento da necessidade total de água pela planta, não se traduz em manejo eficiente da irrigação, mas através do conhecimento de sua demanda hídrica nas diferentes fases fenológicas do ciclo da cultura.

Tendo em vista a importância econômica, social e ambiental do feijão-caupi para o Nordeste Paraense e a escassez de estudos na Amazônia, é necessário conhecer seu

comportamento nessas condições edafoclimáticas, o efeito potencializador e limitador da água no solo em suas variáveis agronômicas e os fatores de resposta da planta ao déficit hídrico, definindo as quantidades de água necessária, bem como o monitoramento da água, compreendendo-se e modelando sua relação no sistema solo-planta-atmosfera, aperfeiçoando as estratégias e práticas relacionadas à gestão da água nas propriedades rurais, visando eficiência e produtividade elevada em seu uso no cultivo do feijão-caupi no Estado do Pará, possibilitando ao produtor a informação do efeito de lâminas de irrigação e a definição de sua utilização em termos de rendimento e produtividade.

A hipótese testada neste trabalho é de que o déficit hídrico aumenta os fatores de resposta da produção (K_y) e de biomassa seca (K_{ss}) e que o estágio fenológico de floração é o mais sensível ao déficit hídrico durante a fase reprodutiva do feijão-caupi cultivar BR3-Tracuateua. Sendo assim, o objetivo principal deste trabalho foi avaliar o efeito de distintas lâminas de irrigação sobre o fator de resposta da produção (K_y) e da biomassa seca (K_{ss}) da fase reprodutiva do feijão-caupi nas condições edafoclimáticas do Nordeste do Estado do Pará e especificamente objetivou-se:

- a) Determinar e avaliar modelos de calibração da estimativa da umidade volumétrica em um Latossolo Amarelo Distrófico do município de Castanhal-PA pela TDR.
- b) Correlacionar valores de umidade obtidos pelo método gravimétrico em função da K_a e da θ fornecida em quatro sensores CS616 da Campbell Scientific.
- c) Realizar balanço hídrico sequencial na área do plantio de feijão-caupi sob distintas lâminas de irrigação durante o ciclo do feijão-caupi.
- d) Estimar a evapotranspiração da cultura e real do feijão-caupi submetido a distintas lâminas de irrigação.
- e) Avaliar os parâmetros de produção do feijão-caupi sem e com restrição hídrica.
- f) Determinar os fatores de resposta K_y e K_{ss} para os estádios da fase reprodutiva do feijão-caupi para as condições climáticas do nordeste paraense.

1.1 Revisão de literatura

1.1.1 Importância socioeconômica, histórico-cultural e ambiental do feijão-caupi

O feijão-caupi tem como centro de origem o continente africano (MOSTASSO et al., 2002) e sua adaptação em regiões tropicais úmidas (VALADARES et al., 2010) fez com que o seu consumo e produção esteja presente em vastas áreas das Américas Central e do Sul, Sudeste e Sudoeste da América do Norte, Oeste da África, Índia, Sul e Sudeste da Ásia, Austrália e Sul da Europa (LIMA et al., 2006).

A introdução no Brasil das primeiras cultivares de feijão-caupi ocorreu a partir do século XVI, provavelmente no Nordeste pelo Estado da Bahia, trago pelos colonizadores espanhóis e portugueses e/ou pelos negros africanos no período da escravidão (FREIRE FILHO et al., 2011) e devido apresentar alta plasticidade a fatores abióticos (FREIRE FILHO et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2011) adaptou-se nas diferentes regiões e nos tipos de clima do Brasil com variados sistemas de produção. No Estado do Pará, o feijão-caupi foi trago por migrantes do Nordeste do Brasil (SANTOS et al., 2009).

O feijão-caupi possui uma diversidade de nomes pela riqueza popular que o identifica e o engradece em cada região que o produz, sendo conhecido na região Nordeste como feijão macassar, feijão macassa, feijão-de-corda, feijão-de-moita, já no Norte por feijão-de-praia. Na Bahia é chamado de feijão catador e feijão gurutuba como também no Norte de Minas Gerais. No Maranhão é conhecido como trepa-pau, no Rio de Janeiro é chamado de feijão fradinho, no Sul de feijão miúdo e em outros países como Paraguai de cumondá, EUA e Nigéria de cowpea, já em países latino americanos de língua espanhola é denominado de parotro (FAPESPA, 2015).

A produção brasileira de grãos para a safra 2017/18 está estimada em 229,53 milhões de toneladas, com incremento de 0,6% na área de plantio, atingindo 61 milhões de hectares, sendo a soja, a maior cultura com área plantada (1,2 milhão de hectares), seguida do algodão (205,6 mil hectares) e do feijão segunda-safra (feijão comum e preto) com 115,1 mil hectares. O feijão-caupi que deve ter 165,2 mil hectares a mais na atual safra, atingindo 1.027,1 mil hectares (CONAB, 2018).

Segundo a CONAB (2018) no calendário agrícola recomendado para o plantio do feijão-caupi na região Norte do Brasil, a primeira safra com janela de semeadura de novembro a dezembro com colheita prevista para fevereiro e março e segunda safra com janela de semeadura de janeiro a maio e com colheita de junho a agosto, tem perdido área devido à baixa tecnologia utilizada para o plantio, dificuldades no manejo, problemas fitossanitários, eventual chuva na colheita e problemas na comercialização vinculadas às exigências de qualidade do grão, reduzindo a produção e o preço na casa de R\$ 50,00 a saca de 60 kg (CONAB, 2018).

Com uma produção mundial média de 6,576 milhões de toneladas de 2010 a 2013 do feijão-caupi, e 5,6 milhões de toneladas em 2014 o feijão-caupi foi produzido em 12,5 milhões

de hectares apresentando uma produtividade média de 446,50 kg ha⁻¹ (FAOSTAT, 2015). Para Menezes Junior et al. (2017) esses dados estão subestimados devido países como o Brasil e Índia não apresentaram os dados estatísticos separados do feijão-caupi e feijão-comum, apesar de apresentarem volumes expressivos de produção.

A área plantada do feijão-caupi e o seu consumo tem aumentado nos últimos anos (NASCIMENTO, 2009). Porém, a produção brasileira não é contabilizada pela FAO, além do que, o IBGE em seus relatórios não apresenta informações técnicas e produtivas específicas da produção nacional e regionalizada, o que dificulta o conhecimento da cadeia produtiva, investimentos na área e as exportações para o mercado internacional (DAMASCENO, 2009). Porém, a CONAB (2018) já estabelece a divisão dos tipos de feijão inclusive do feijão-caupi e todas as informações mensais da produção nacional e regional em seus levantamentos da produção da safra de grãos brasileira.

Os três maiores países produtores do feijão-caupi são Nigéria (2,1 milhões de toneladas), Níger (1,6 milhão de toneladas) e Burkina Faso (571 mil toneladas). Além desses, o Brasil, Mali e Tanzânia são os principais produtores (FREIRE FILHO, 2011), já a Croácia, Palestina, República da Macedônia, Trinidad Tobago, Bósnia Herzegovina, Egito e Filipinas apresentam maiores produtividade do grão, acima de 2.500 kg ha⁻¹ (MENEZES JUNIOR et al., 2017). O feijão-caupi é, sem dúvida, uma das culturas anuais dos países tropicais e subtropicais mais cultivada no mundo (LANGYINTUO et al., 2003) com um consumo per capita de 19,56 kg pessoa⁻¹ ano⁻¹ e o preço médio histórico da saca de US\$ 31,96 (AGRIANUAL, 2013).

Apresentando excelente desempenho na composição da produção agrícola brasileira com comprovada viabilidade econômica e valor de produção estimado em R\$ 643.553.333,00, gerando 961.993 empregos, alimentando 26.505.491 pessoas, principalmente da população nordestina e nortista brasileira (MENEZES JUNIOR et al., 2017), o consumo do feijão-caupi ocorre geralmente na forma de grãos secos, vagens ou grãos verdes como hortaliças com umidade de 60 a 70% que permite ser uma cultura de valor econômico para a comercialização com mercado interno e externo ascendente (OLIVEIRA et al., 2001). Cerca de 80% do feijão produzido no Pará é do gênero *Vigna* e é responsável por gerar mais de 70 mil empregos diretos (SEDAP, 2017).

Segundo Silva (2016) estimativas não oficiais mostram que em 2015 o Brasil produziu 452.013 t de feijão-caupi colhidas em 1.078.040 ha com uma produtividade média de 419 kg ha⁻¹, colocando o Brasil como o quarto maior produtor mundial de feijão-caupi. Os maiores produtores brasileiros em 2015 foram os Estados do Mato Grosso (127.000 t), Ceará (107.291 t), Piauí (55.278 t), Pernambuco (52.406 t), Maranhão (50.314 t) e Bahia (20.890 t), onde o

Ceará apresentou a menor produtividade de grãos com 270 kg ha^{-1} , enquanto o Mato Grosso, a maior produtividade, com 1.095 kg ha^{-1} (MENEZES JUNIOR et al., 2017).

O semiárido nordestino e pequenas áreas na Amazônia cultivadas pela agricultura familiar são destaques na produção nacional do feijão-caupi com práticas tradicionais de cultivo, com baixo uso de tecnologias e baixas produtividades de grãos (LIMA FILHO et al., 2013; MENEZES JUNIOR et al., 2017). A cultura é responsável por 34% da área plantada e 15,6% da produção de feijão do Brasil, onde para cada hectare cultivado gera-se um emprego/ano (OLIVEIRA, 2011). As Regiões Nordeste e Norte do Brasil destacam-se por apresentarem maior consumo do feijão-caupi, especialmente na zona rural, variando de 9,2 a $21,8 \text{ kg pessoa}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ com média regional de $15 \text{ kg pessoa}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (FREIRE FILHO, 2011). Na Região Norte, os principais Estados produtores do feijão-caupi são: Amapá, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins (EMBRAPA, 2015).

Por ser uma cultura de subsistência (MOUSINHO et al., 2008) com alta adaptabilidade (elevada produtividade), ampla adaptabilidade (elevada estabilidade) e influenciada significativamente pelo ambiente na manifestação do seu potencial genótipo (FREIRE FILHO et al., 2003), o aumento das pesquisas do feijão-caupi nos últimos anos, tem contribuído para melhorar sua produtividade e rentabilidade, o que, aliado a outros fatores, vem aumentando o interesse de médios e grandes produtores pela cultura, por exemplo, a potencial expansão para a região Centro-Oeste do Brasil (FREIRE FILHO et al., 2005; BEZERRA et al., 2008; FREIRE FILHO et al., 2009).

Além do cultivo convencional do feijão-caupi, a cultura é usada em consórcio e em sistemas de rotação de culturas com arroz, soja, milho, coco e citros em função de suas diferenças fisiológicas e morfológicas durante a safra e safrinha, gerando renda as famílias agricultoras no período com menor níveis de precipitação, além de realizar fixação biológica de nitrogênio pela simbiose com bactérias do gênero *Rhizobium*, o que melhora as propriedades físicas e químicas do solo como adubo verde, sendo usado ainda como forragem verde, feno, ensilagem e farinha para alimentação animal (BUZETTI et al., 1990; ANDRADE JÚNIOR, 2000; BEZERRA et al., 2010).

1.1.2 Botânica e condições edafoclimáticas

O feijão-caupi é uma planta dicotiledônea pertencente à ordem Fabales, família Fabacea, subfamília Faboideae, tribo Phaseoleae, subtribo Phaseolinae, gênero *Vigna*, espécie *Vigna unguiculata* (L.) Walp (ONOFRE, 2008).

É uma planta herbácea de rápido crescimento, ciclo curto (60 a 80 dias) que permite pela sua arquitetura boa cobertura do solo, possui flores hermafroditas e autofecundação, seus frutos são do tipo vagem com propagação realizada por sementes, apresenta autofecundação, baixa taxa de alogamia ou fecundação cruzada e desenvolve-se em condições de elevadas temperaturas, solos de textura arenosa ou média, bem drenados, baixa exigência hídrica e baixa fertilidade do solo (TEÓFILO et al., 1999; EMBRAPA, 2003; FREIRE FILHO, 2005).

O feijão-caupi possui dois tipos de hábitos de crescimento, o determinado no qual, o caule produz um número limitado de nós e estagna seu crescimento quando emite uma inflorescência (ARAÚJO et al., 1981). No indeterminado, o caule continua crescendo e emitindo novos ramos secundários e gemas florais, sendo o tipo mais cultivado no Brasil. O porte da planta é classificado em quatro tipos principais: ereto, semiereto, semiprostado e o prostado (FREIRE FILHO et al., 2005).

A cultura exige no mínimo 300 mm de chuva para que produza sem a necessidade de utilização da prática da irrigação, sendo regiões com valores anuais de chuva entre 250 e 500 mm aptas para sua implantação (ANDRADE JUNIOR et al., 2002). A faixa de temperatura para o bom desenvolvimento varia de 18 a 34 °C. A temperatura mínima suportável na germinação varia de 8 a 11 °C e na floração inicial de 8 a 10 °C. As cultivares de feijão-caupi sensíveis ao fotoperíodo são consideradas plantas de dias curtos e quando submetidas ao vento constante, o consumo de água pela planta pode aumentar, tornando-a mais suscetível a períodos curtos de estiagem, porém são consideradas eficientes na interceptação da energia luminosa devido suas folhas sem pelos e coloração verde-escura (EMBRAPA, 2018).

Para Silva et al. (2010) e Ramos et al. (2012), a faixa de 370 a 570 mm é a quantidade necessária de lâmina de irrigação total para o desenvolvimento satisfatório do feijão-caupi. Para Andrade Junior et al. (2002) o cultivo de feijão-caupi pode ser realizado em Latossolos Amarelos, Latossolos Vermelho-Amarelos, Argissolos Vermelho-Amarelos e Neossolos Flúvicos. A planta desenvolve-se bem em solos com regular teor de matéria orgânica, soltos e profundos, arejados e dotados de média a alta fertilidade até mesmo em Latossolos e Neossolos Quartzarênicos porém, com aplicações de fertilizantes químicos e/ou orgânicos.

1.1.3 Valor nutricional do grão

O feijão-caupi apresenta papel socioeconômico fundamental e estratégico nas regiões Norte e Nordeste (BEZERRA et al., 2008; SOUZA et al., 2011). Leguminosa adaptada a condições ambientais adversas (CARVALHO et al., 2000) é considerado um alimento básico das populações mais pobres e que sofrem com a desnutrição, suprimindo a necessidade alimentar dessas camadas, pois apresenta características nutricionais desejáveis de proteínas, carboidratos, fibras, ferro, zinco, manganês, fósforo, potássio e lipídeos com um valor calórico estimado de 323,4 kcal 100 g⁻¹ de semente (FROTA et al., 2000).

1.1.4 Cultivar BR3-Tracuateua

O Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Úmido (CPATU), atualmente Embrapa Amazônia Oriental lançou no Estado do Pará no ano de 1984, a cultivar BR3-Tracuateua, sendo difundida e cultivada em larga escala com excelente aceitação pelos produtores, principalmente da região Bragantina. Recomendada para o cultivo de sequeiro e após anos de cultivo, a cultivar BR3-Tracuateua teve perda de sua identidade genética, acumulando variações no tipo de porte, folha, cor da flor, forma e tamanho de grãos, o que comprometeu o manejo da lavoura, especialmente a colheita e os preços de comercialização no mercado (EMBRAPA, 2005).

Assim, houve a necessidade de um trabalho de purificação e relançamento comercial (FREIRE FILHO et al., 2005) a fim de, recuperar a originalidade da cultivar que foi realizada através da seleção de plantas individuais com teste de progênies que resultou na escolha da progênie 235 por apresentar as melhores características, sendo denominada de BR3-Tracuateua Purificada.

A cultivar purificada apresenta porte prostrado, geralmente não forma grande volume de ramas, possui inserção das vagens no nível da folhagem, grãos de cor branca, grandes, reniformes com tegumento levemente enrugado, ciclo de 60 a 75 dias, com plantio entre os meses de dezembro e março (Período chuvoso). Nos ensaios, realizados pela EMBRAPA, a cultivar BR3-Tracuateua purificada apresentou uma produtividade média de 1.435,6 kg ha⁻¹, superando a cultivar original em 9%. Os resultados evidenciam que as misturas estavam reduzindo a produtividade da cultivar e que, com sua eliminação, foi possível recuperar seu verdadeiro potencial produtivo (EMBRAPA, 2005).

1.1.5 Ciclo Fenológico

O desenvolvimento do feijoeiro ocorre em duas grandes fases, a vegetativa e a reprodutiva que são distintas pela manifestação de diferentes eventos (FUSCALDI e PRAD, 2005). O estudo do feijão-caupi para Freire (1990) deve ser dividido em etapas fenológicas, devido cada fase de desenvolvimento apresentar comportamentos bastante diferenciadas em virtude das particularidades fisiológicas e morfológicas da planta.

Segundo Câmara (1997) o tempo de duração entre os diferentes estádios de desenvolvimento da planta é variável devido a diversos fatores como cultivar, temperatura, clima e época de semeadura, dentre outros.

A escala proposta por Gepts e Fernández (1982) de desenvolvimento do feijão-caupi apresenta o ciclo biológico dividido em dez etapas, representadas na forma de letra acompanhada de um número. A letra indica a fase como exemplo, o (V) a fase vegetativa e o (R) a fase reprodutiva. Os números indicam a posição da etapa de desenvolvimento da planta dentro da escala de desenvolvimento.

As dez etapas do feijão-caupi são: V0 (germinação), V1 (cotilédone acima do solo), V2 (folhas cotiledonares expandidas), V3 (primeira folha trifoliolada), V4 (terceira folha trifoliolada), R5 (primeiro botão floral), R6 (antese da primeira flor), R7 (Primeira vagem tipo canivete), R8 (enchimento de grãos) e R9 (maturação fisiológica).

1.1.6 Reflectometria no domínio do tempo e o monitoramento da água no solo

A modernização da agricultura na Amazônia com tecnologias que elevem a produtividade, gere menos impacto ao meio ambiente e seja economicamente viável é um processo necessário, sendo a irrigação uma ferramenta que pode promover essa mudança com aumento da produtividade do feijão-caupi e de outras culturas, tornando eficiente o uso do solo e da água, sendo então indispensável a produção de conhecimento, informações técnicas e de tecnologias para o manejo da irrigação que forneçam suporte aos produtores no Estado do Pará (SOUZA et al., 2012).

Garzella (2004) afirmam que nos últimos vinte anos, o potencial para se melhorar o manejo da irrigação aumentou substancialmente devido, entre outros fatores, principalmente à disponibilidade comercial de instrumentos de medição da umidade do solo para determinação

de quando e quanto irrigar. O estudo e o monitoramento das condições de solo e clima durante o desenvolvimento da cultura, permitem proporcionar, com alta precisão, a quantidade requerida de água no momento oportuno, a partir de instrumentos de medida e controle instalados no campo (PAZ et al., 2000).

O solo é o principal reservatório de água que, temporariamente, armazena água, fornecendo-a às plantas conforme suas necessidades. Como a recarga deste reservatório é inconstante, o volume disponível às plantas é variável (REICHARDT, 1985). A crescente demanda de água para diversas finalidades, torna seu manejo, uma questão séria e complexa, buscando-se então, eficiência em regiões que apresentam problemas de falta de chuva e para regiões onde a chuva é suficiente, porém, apresenta problemas de distribuição ao longo do ano (REICHARDT, 1987).

O solo é descrito como uma coleção de corpos naturais, constituídos de partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos e de material orgânico e mineral (REICHARDT; TIMM, 2004). Sob o ponto de vista físico, o solo é um sistema poroso constituído por partículas sólidas, líquidas, gasosas e volumes de vazios que podem ser ocupados pelo ar e pela água, sendo, portanto, um armazenador de água e nutrientes para as plantas (KLAR, 1984).

O volume de sólidos pode ser considerado praticamente fixo, enquanto os gases e a solução dividem o espaço poroso do solo. Quando a quantidade de solução ou a umidade do solo aumenta, diminui-se a quantidade de gases e vice-versa. Com isto, existem duas condições distintas para a fase líquida do solo, quando o volume total de poros estiver totalmente preenchido por água chamado de solo saturado ou parcialmente preenchido por água não saturado (BERNARDO et al., 2006).

A textura é a distribuição das partículas do solo quanto ao seu tamanho que são divididas em três frações de tamanho de partícula, chamadas frações texturais: areia, silte e argila (ALBUQUERQUE; DURÃES, 2008) e influenciam diretamente na dinâmica da água no solo apresentando propriedades e comportamentos bastante diferenciados. A fração areia devido ao maior tamanho de partícula, permite aos solos com predominância nessa fração, maior permeabilidade à água e ao ar, porém com baixa capacidade de retenção de água e baixa coesão. A fração silte representa as partículas de tamanho intermediário, enquanto que a argila com menor diâmetro, apresenta grande área superficial específica, permitindo aos solos com predominância nessa fração, elevada retenção de água, plasticidade, fluxo lento de ar e água e alta coesão entre as partículas (REICHARDT; TIMM, 2004; BRADY; WEIL 2008).

Os solos apresentam grande amplitude de massa específica (ρ_s) em função de suas características mineralógicas, de textura e de teor de matéria orgânica. Solos arenosos

apresentam valores de massa específica superior aos argilosos, enquanto que solos siltosos apresentam densidade intermediária (LIBARDI, 2005). Solos argilosos apresentam alta agregação das partículas de argila, da qual resulta a porosidade intra-agregados, que aumenta o volume do espaço poroso, principalmente aqueles poros com diâmetro reduzido (BRADY; WEIL 2008). A ρ_s é uma relação entre massa de solo seco e seu volume, sendo, portanto afetada por modificações na estrutura e no arranjo das partículas do solo (KLEIN, 2008).

A umidade do solo é um dos fatores mais importantes para o controle dos processos hidrológicos, influenciando o escoamento superficial, evaporação, transpiração das plantas e em várias interações geográficas e pedogênicas (ÁVILA et al., 2010). As propriedades do solo, as práticas culturais, o manejo do solo, a quantidade e intensidade de aplicação de água e o estágio de desenvolvimento das culturas são fatores que afetam a umidade do solo (PALTINEANU; STARR, 1997) que varia com o tempo, chuva, ascensão capilar, irrigação, drenagem e a evapotranspiração (REICHARDT, 1987), sendo o sistema solo-água dinâmico, tanto no perfil do solo quanto na área.

As variações espaciais dos mais diversos atributos físicos, condicionam a distribuição de água no solo e conseqüentemente influenciam no rendimento das culturas (SIQUEIRA, 2006). Conhecer o conteúdo da água do solo de uma determinada região ou de um perfil de solo, é de grande importância para fornecer tomadas de decisões, como escolha do manejo de irrigação, projetos de drenagem e estudos do processo solo-planta-atmosfera (BERNARDO et al., 2006).

O monitoramento do conteúdo da água do solo em condições de campo é difícil de ser realizado, devido ao crescimento desigual das plantas, desuniformidade da distribuição do sistema radicular, diferenças em características de infiltração, variabilidade do solo com relação à estrutura, à estratificação e à textura, mudanças na densidade do solo, variação do volume de poros e da distribuição de tamanho de poros, desigualdades no relevo e desuniformidade inerente à irrigação (ALBUQUERQUE e DURÃES, 2008).

Por ser fundamental no desenvolvimento das plantas e apresentar várias implicações nas propriedades físicas do solo, a determinação do teor de água do solo é de grande interesse nos aspectos científicos e econômicos. Para se determinar o conteúdo de água do solo existem vários métodos e técnicas e as principais diferenças entre os métodos estão na forma de medição, local de medição, instalação, preço, tempo de resposta e operacionalidade no campo (MANTOVANI et al. 2009).

Tommaselli (1997) afirma que os métodos para determinação da umidade no solo dividem-se em métodos diretos que se utilizam da medição efetiva da água contida no solo, e

tem como representante o método gravimétrico com secagem na estufa usado como padrão ou referência para todos os outros, e os métodos indiretos que se utilizam de propriedades físicas ou físico-químicas do solo que sejam proporcionais ao seu teor de água tendo como representantes a medida da condutividade elétrica, termalização de nêutrons rápidos, atenuação de raios gama, tensiometria e reflectometria de microondas no domínio do tempo (TDR).

O método termogravimétrico ou gravimétrico cujo conteúdo de água no solo é quantificado com base na diferença entre a massa de uma amostra de solo obtida antes e após secagem da mesma em uma estufa a 105-110 °C até obter-se massa constante é considerado o método padrão (MUÑOZ-CARPENA et al., 2005). As amostras de solo utilizadas nesta metodologia são retiradas na profundidade de determinação da umidade pretendida, geralmente em recipientes de alumínio com estrutura deformada ou não (REICHARDT, 1985).

O método padrão da estufa, além de possuir boa precisão e ser utilizado como referência para a calibração de outros equipamentos para estimativa da umidade do solo, apresenta baixo custo de realização, não necessitando de equipamentos sofisticados e ou adição de produtos químicos (VIELMO, 2008). Entretanto, seu caráter destrutivo, não permitindo a repetibilidade da medida em um mesmo ponto, além do tempo de espera relacionado à determinação do teor de água no solo são desvantagens do método.

A reflectometria no domínio do tempo (TDR) é uma técnica revolucionária inseridas em sensores de umidade do solo que permite medidas rápidas, exatas, passíveis de automação e de repetição no mesmo local, com o mínimo de perturbação do solo, possibilitando o monitoramento da água no solo, sendo uma ferramenta em potencial na pesquisa e extensão no manejo dos recursos hídricos (LIMA et al., 2018). A variável água e suas transferências no ambiente devem ser compreendidas para que se possa intervir com um manejo eficiente, elucidados por modelos que descrevam os processos agrônômicos, hidrológicos e ambientais (TSEGAYE et al., 2004).

Historicamente Looor (1964) estudou na Holanda as propriedades dielétricas de misturas heterogêneas, Fellner-Feldegg (1968) introduziu a técnica na pesquisa de líquidos e sólidos na Califórnia, Davis e Chudobiak (1975) aplicaram a técnica na determinação do conteúdo de água no solo e Toop et al. (1980) implementaram e validaram a tecnologia para o monitoramento da água, ambos em solos do Canadá, sendo no Brasil introduzida na pesquisa da ciência do solo na região sudeste por Herrmann Júnior (1993) para várias classes de solos.

O princípio da técnica é baseado na propriedade física dos materiais denominada de constante dielétrica aparente (K_a) cujo valor da água ($K_a = 80$) é superior ao da matriz seca do solo ($K_a = 3$) e do ar ($K_a = 1$). A K_a representa a relação entre a capacitância de um meio isolador

e o espaço livre, sendo a K_a medida no tempo (t) para uma sequência de pulsos eletromagnéticos emitidos por um gerador que percorrem as hastes de sonda de comprimento (L) do equipamento até o final e sendo refletido a partir da extremidade das hastes, retornando à cabeça da sonda, que por sua vez, detecta a reflexão e aciona o pulso seguinte (WANG, 1980; OR & WRAITH, 1997).

A técnica TDR então, consiste em medir a velocidade (razão entre o deslocamento de um corpo ou ponto material e o tempo despendido para realizar esse deslocamento) de propagação de um pulso eletromagnético e, através desse valor, estimar a constante dielétrica do material circundante, no caso o solo através de modelos matemáticos. O aparelho mede o tempo transcorrido entre a emissão do pulso de voltagem e a recepção do pulso ressoante (TOPP et al., 1980).

A polarização das moléculas de água e o elétron é um processo lento e o maior conteúdo de água no solo, aumenta o tempo de deslocamento do pulso e a K_a o que diminui a velocidade do pulso ($v = c / t$), onde c é a velocidade da luz ($\approx 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$), sendo a K_a determinada pela equação $K_a = (c t / 2 L)^2$ e sua correlação com a umidade volumétrica no solo (θ) medida pelos equipamentos inseridos no solo por meio de modelos empíricos e semi-empírico/físico, as denominadas curvas de calibração obtidas em pesquisa de campo ou laboratório. A partir dessa relação é determinada a umidade no solo em unidade de massa ou volume (TOPP et al., 1980; ROTH et al., 1990; TOMMASELLI e BACCHI, 2001; SANTOS et al., 2010).

Para dado solo, a resposta à excitação eletromagnética é, portanto, uma função do teor de água livre, porque a constante dielétrica da água é superior a do solo seco, sendo os resultados desta técnica comparados com aqueles obtidos pelo método gravimétrico para calibração dos sensores (LEDIEU et al., 1986). Os trabalhos relativos à calibração dos equipamentos com a TDR têm mostrado inconsistência nos valores da constante dielétrica aparente, obtidos pela TDR em solos de texturas semelhantes ou diferentes (TOMMASELLI e BACCHI, 2001), em solos com altos teores de óxido de Fe e em solos de diferentes densidades e porosidades (MALICKI et al., 1996).

Algumas equações clássicas já foram criadas para explicar a constante dielétrica, como a equação de Topp et al. (1980), utilizada para estimar o conteúdo de água no solo. Esta apresenta uma relação entre umidade e constante dielétrica aparente do solo que poderia ser utilizada para uma ampla diversidade de solos, desconsiderando-se praticamente toda a influência pertinente aos demais componentes do solo que concorrem para a constante dielétrica aparente, tais como sais, textura e densidade.

Joaquim Júnior (2003) explica que outras características do solo influenciam nas medidas do TDR, como temperatura, teor de matéria orgânica, manganês e teor de água higroscópica no solo. Entretanto, é consenso entre pesquisadores do assunto que o modelo proposto por Topp et al. (1980) não possui aplicabilidade universal, uma vez que os atributos do solo como o elevado teor de óxido de ferro em solos tropicais podem conferir erros às medições (TOMMASELLI, 1997).

Villwock et al. (2004) propõe um método de calibração em campo para um Latossolo Vermelho Distroférico, enquanto Coelho et al. (2006) e Vaz et al. (2004) apresentam propostas de métodos e ajustes de equações de calibrações para diferentes tipos de solos em condições de laboratório com uso de amostras deformadas e indeformadas.

Modelos de calibração empíricos para o ajuste de valores do conteúdo volumétrico de água no solo obtidos a partir da constante dielétrica aparente do solo (K_a) foram obtidas por Topp et al. (1980) na suíça para várias classes de solos assim como Ledieu et al. (1986), onde ambos esses modelos são inseridos em sensores de umidade do solo comercializados no mundo.

Tommaselli e Bacchi (2001) obtiveram para um latossolo vermelho em São Paulo modelos de calibração que diferiram de Topp et al., (1980). Modelos físicos ou semi-empíricos como os de Malicki et al. (1996) e Roth et al. (1990) são considerados robustos por terem inseridos em sua estrutura parâmetros físicos do solo como densidade aparente e porosidade do solo, respectivamente. Porém, a literatura é unânime em discordar de todos esses modelos de calibração, recomendando que seja realizada para cada local que se usa sensores de umidade do solo com a TDR, a calibração do equipamento a fim de, corrigir problemas de sub ou superestimativas do conteúdo volumétrico de água no solo.

Erros na estimativa da umidade no solo podem induzir a aplicação excessiva de água durante as operações de irrigação, o que pode resultar em restrição de oxigênio para as raízes devido à redução na porosidade de aeração, lixiviação de nutrientes ou diminuição das atividades metabólicas da planta pela falta de água (BASSEGIO et al., 2012; DUTRA et al., 2012; WAN et al., 2013).

1.1.7 Irrigação no Brasil e no Pará

A produtividade de uma área é conseguida com bom manejo e pacote tecnológico do produtor, que inclui o maior controle com perseguição a eficiência no uso da água (CONAB, 2018). Em 2016, a agricultura irrigada foi responsável por 46,2 % do volume de água retirado

dos corpos hídricos do país. Embora se reconheça diversos dos benefícios relacionados a prática da irrigação, ainda há dificuldades de dimensionar sua importância na quantidade atualmente produzida de grãos e o seu papel na segurança alimentar e nutricional da sociedade brasileira (ANA, 2017).

Dentre os sistemas de irrigação que demonstram maior eficiência no uso da água está o grupo de irrigação localizada (gotejamento e microaspersão) e aspersão por pivô central, representando cerca de 70% do incremento de área irrigada no país entre 2006 a 2016. Essa expansão é devida principalmente ao algodão, milho, feijão e soja no cerrado e é sobre esse grupo que até 2030 a maior parte da irrigação deve ocorrer (CONAB, 2018). Esse é o cenário que impõe desafios aos produtores e ao governo com vistas ao correto direcionamento de recursos, assistência e monitoramento visando a sustentabilidade econômica-ambiental da agricultura em detrimento da demanda alimentar (ANA, 2018).

A obtenção de uma alta produção requer adoção de práticas de manejo que visem melhorar a irrigação, e isto só é possível quando se conhece as necessidades hídricas de uma cultura (CORDEIRO et al., 1998). Segundo Souza et al. (2012) 81,31% das propriedades agrícolas com irrigação, não receberam orientação técnica. O conhecimento do crescimento da cultura em função da água disponível no solo é instrumento fundamental para explicar perdas de produção em condições de déficit hídrico (LEITE et al., 1999). Em geral, o que mais interessa são os efeitos do déficit hídrico sobre o crescimento e o desenvolvimento da cultura, o que, conseqüentemente, limita o rendimento (MAÑAS & VALERO, 1993).

A disponibilidade hídrica no solo é um fator relevante que pode levar a maximização dos ganhos de produtividade agrícola, tornando importante o estudo dos métodos e técnicas de manejo da irrigação que compatibilizem quantidades mínimas adequadas de água, correlacionadas aos requerimentos das etapas fenológicas da planta, elevando o rendimento da cultura e norteadando o momento de aplicação da água baseado nas relações água-solo-planta-atmosfera (CARVALHO et al., 2000).

A aplicação de pouca água no solo pode ser um desperdício, observando que a produtividade não será satisfatória, já a aplicação excessiva é destrutiva pois promove a saturação do solo, lixiviação de nutrientes, indução de maiores taxas de evaporação, salinização do solo e redução da aeração (ALBUQUERQUE, 2001).

Segundo IBGE (2017), o Estado do Pará possui uma área irrigada de 101.625 ha em 14.808 estabelecimentos agrícolas e ocupa a 15ª posição no ranking nacional. Em 1º lugar, 50,70 % da irrigação é realizada por métodos tradicionais e/ou molhamento que são regas manuais, por meio da utilização de mangueiras, baldes, regadores, latões dentre outros, o que é

preocupante devido ao baixo nível tecnológico, elevado custo operacional dos sistemas e baixa eficiência de aplicação da água. Em 2º lugar com 18,38 %, as irrigações são realizadas por gotejamento e em 3º lugar 11,72 % é realizada por microaspersão, os demais métodos de irrigação utilizados nos estabelecimentos do Pará são descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Métodos de irrigação utilizados nos estabelecimentos com área irrigada no Estado do Pará.

Método utilizado	Nº de estabelecimentos	Área (ha)	%	Posição
Outros métodos de irrigação e/ou molhação	7.508	24.722	50,70	1
Gotejamento	2.721	16.192	18,38	2
Localizado (microaspersão)	1.736	40.552	11,72	3
Aspersão convencional	1.557	9.709	10,51	4
Subsuperficial	829	4.302	5,60	5
Outros por superfície (corrugação / faixa)	136	1.009	0,92	6
Aspersão (pivô central)	130	3.196	0,88	7
Autopropelido / carretel enrolador	82	1.364	0,55	8
Inundação	61	460	0,41	9
Sulcos	48	119	0,32	10
Total	14.808	101.625	100	-

Fonte: Censo Agropecuário. IBGE, 2017.

No Estado do Pará, os sistemas pressurizados (aspersão e localizada) são empregados em 69.649 ha, o que representa 68,54 % da área irrigada total no Estado. A modernização da agricultura paraense com o objetivo estratégico de aumento da produção de grãos deve passar pela adoção da irrigação e de outras melhorias tecnológicas pelo produtor acompanhada e antecedida por aperfeiçoamento em insumos, serviços, máquinas e implementos, visto que a produção do feijão irrigado apresenta rendimentos 2,5 vezes superiores aos da produção de sequeiro (ANA, 2017).

A Região do Guamá é a que possui mais propriedades agrícolas com irrigação e concentra 43,2% dos estabelecimentos. Esta região faz parte da mesorregião do Nordeste

Paraense, que é considerada uma das mais antigas áreas de exploração agrícola da Amazônia, com o processo de colonização tendo iniciado por volta de 1875 (NICOLI, 2006).

1.1.8 Balanço hídrico no solo

O conhecimento das relações hídricas no sistema solo-planta-atmosfera é necessário para quantificação das necessidades hídricas da cultura durante seu ciclo de desenvolvimento, a fim de, auxiliar no planejamento e manejo da água nas lavouras, em programas de regionalização de cultivares, na estimativa de rendimento da cultura em regiões específicas, no zoneamento agroclimático e de risco climático e em práticas de manejo com uso sustentável dos recursos hídricos disponíveis (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

Dentre os métodos que podem ser usados para compreender a variação do armazenamento de água no sistema solo-planta-atmosfera é o balanço hídrico, dividido em balanço hídrico climatológico, balanço hídrico sequencial, balanço hídrico de cultivos, onde ambos se traduzem na contabilização da água no solo, resultante da aplicação do princípio de conservação das massas em um determinado volume de controle considerado, apresentada por Reichardt (1985), onde geralmente adota-se a área de 1 m² como representativa de toda a área (PEREIRA et al., 2002).

A equação de Reichardt (1985) simplificada, integrada com relação ao tempo e à profundidade, resulta na equação (1) do balanço de água no solo.

$$P + I - ET \pm QZ \pm ES = \pm \Delta A \quad (1)$$

Em que:

ET – evapotranspiração da cultura (mm);

P – precipitação (mm);

I – irrigação (mm);

Qz – drenagem profunda ou ascensão capilar (mm);

ES – escoamento superficial (mm);

ΔA – variação do armazenamento (mm) da água do solo na camada de 0 – z para o intervalo de tempo considerado no balanço; z- profundidade do solo considerada.

O modelo mais simples para o balanço de água no solo é o modelo de balde (“bucket model”), onde assume-se que o solo tem capacidade fixa para armazenar água que está disponível para a evapotranspiração (HARTMANN, 1994),

Para se efetuar o balanço hídrico de uma cultura é necessário computar as entradas de água no solo via precipitação pluvial ou irrigação, a partir da sua infiltração na superfície, e as saídas, representadas pela drenagem profunda, evapotranspiração e escoamento superficial em um volume de solo durante determinado período de tempo (LIBARDI, 2000). Segundo Libardi (1995) se a quantidade de água que entra no tempo considerado for maior que a quantidade que sai durante o mesmo período, o saldo será positivo e, caso contrário, será negativo, sendo tanto o saldo positivo e o negativo medidos pela variação de armazenagem de água no perfil do solo no período considerado.

A dinâmica da água no solo está diretamente relacionada à produção vegetal e seu conhecimento é de interesse fundamental para qualquer tomada de decisão sobre a exploração agrícola dos solos. Portanto, a melhor caracterização dos fatores que interferem neste movimento se torna imprescindível, uma vez que o movimento da água no sistema solo-planta-atmosfera envolve processos como infiltração, redistribuição, drenagem e absorção pelas plantas, os quais podem ser medidos ou estimados pelo método do balanço hídrico (LIMA et al., 2006).

O conhecimento de como as plantas utilizam a água no solo e de como respondem aos níveis de armazenagem a partir do balanço hídrico, pode ser uma saída viável para o estabelecimento de estratégias eficazes de manejo visando melhor uso possível das reservas de água no solo pelas culturas. O movimento cíclico da água na lavoura começa com a sua penetração no solo por meio da infiltração, continua com seu armazenamento temporário na zona do sistema radicular e termina com sua remoção do solo por meio da drenagem, da evaporação e da absorção pelas raízes (HILLEL, 1970).

A importância do balanço hídrico como ferramenta para avaliar a intensidade das saídas e entradas de água no solo e, por conseguinte, na definição dos períodos mais prováveis de déficit hídrico para a cultura, está relacionada não só ao conhecimento dos fatores que o compõem, mas ao conhecimento das características da planta, principalmente da sua fenologia, que representa o ponto de partida para a interpretação coerente dos resultados do balanço (CINTRA et al., 2000).

Para Thornthwaite & Mather (1955) o balanço hídrico climatológico é apresentado em escala mensal e anual, porém pode ser utilizado para o acompanhamento de água no solo em tempo real, chamado de balanço hídrico sequencial ou seriado em escala de tempo diária,

quinquidial, semanal, decendial ou mensal, sendo que, o balanço hídrico específico de uma cultura considera o tipo de vegetação, fases fenológicas, a capacidade de água disponível no solo de acordo com suas propriedades físico-hídricas como capacidade de campo, ponto de murcha permanente, densidade do solo e profundidade efetiva do sistema radicular onde está concentrada 80% das raízes, e nas áreas que adotam sistema de irrigação, deve-se calcular a água facilmente disponível que é aquela extraída do solo sem que ocorra déficit hídrico na planta (PEREIRA et al., 2002)

A umidade do solo é importante para o crescimento das plantas, estando altamente relacionada com as características temporais e de intensidade das variáveis agrometeorológicas. A precipitação efetiva depende da intensidade da chuva, da taxa na qual a água é removida do solo através do escoamento superficial, percolação profunda ou drenagem e da evaporação da superfície do solo determinada pela temperatura e umidade relativa do ar (AMPOFO, 2006). Segundo Lima et al. (2006) a partição da precipitação que atinge o solo em evaporação, transpiração, infiltração e/ou escoamento superficial, é controlada principalmente pela interface solo-biosfera-atmosfera.

Através da medição no campo dos variados componentes do balanço hídrico no solo, a evapotranspiração também pode ser estimada por lisímetros que são tanques cheios de solo perturbado e não-perturbado onde a cultura cresce e desenvolve. Os lisímetros podem ser de pesagem onde a água é medida pela mudança de massa e lisímetro de drenagem que através da dedução da água drenada e a entrada pela chuva ou irrigação, obtém-se o quanto que houve de evapotranspiração. Devido os lisímetros serem caros, difíceis de construir, exigirem cuidados especiais na manutenção e operação, seu uso é limitado a propósitos específicos de pesquisa (ALLEN et al., 1998).

Através do método do balanço hídrico, determinando a evapotranspiração do feijão por meio de microlisímetro, Guimarães et al. (1982) encontraram o consumo aos 10 dias após a germinação, floração e início da maturação de 2,3; 7,1 e 1,5 mm dia⁻¹, respectivamente. Farias et al. (2017) estudando a demanda hídrica do feijão-caupi cultivar BR3-Tracuateua por meio de lisímetros de drenagem no Pará, obteve a evapotranspiração da cultura total e média de 267,73 mm e 3,7 mm dia⁻¹.

Lima et al. (2006) na Paraíba em um Latossolo Amarelo, determinaram a evapotranspiração do feijão-caupi total de 383,02 mm e média 4,2 mm dia⁻¹, sendo consumido nas fases de emergência, vegetativa, reprodutiva, maturação e senescência 7,31; 2,84; 3,65; 4,49 e 5,10 mm dia⁻¹ respectivamente, com duração das fases de 14, 34, 29, 5 e 11 dias.

Calvache et al. (1998) observaram valores médios de 4,6 mm dia⁻¹, obtidos pelo método do balanço hídrico na fase reprodutiva, sendo essa a fase de maior consumo hídrico pelo feijão, assim como no trabalho de Lima et al. (2006).

Bastos et al. (2008) utilizando lisímetro de pesagem eletrônico no Piauí, encontraram para o feijão-caupi variedade BR-17 Gurguéia, evapotranspiração total de 288,5 mm e média de 4,1 mm dia⁻¹, sendo o estágio reprodutivo com 5,4 mm dia⁻¹ com maior demanda hídrica. Murga-Orrillo et al. (2016) em Roraima encontraram a evapotranspiração total e média do feijão-caupi cv. Novaera sem e com cobertura morta de 311 e 260,4 mm e 3,5 e 3,0 mm dia⁻¹, respectivamente, com maior demanda hídrica no estágio reprodutivo de 5,4 mm dia⁻¹ sem cobertura e 4,9 mm dia⁻¹ com cobertura morta. A maior evaporação no solo sem cobertura deu-se pela ação da radiação direta no solo.

1.1.9 Evapotranspiração

Proposto por Thornthwaite e Wilm (1944) o termo evapotranspiração (ET) é a combinação de dois processos separados pelos quais a água é perdida por evaporação em uma superfície do solo, rios, lagos, oceanos e pela transpiração das culturas pelas folhas e em alguns casos pelo tronco das árvores, através da perda de vapor d'água nas paredes celulares em direção aos espaços intercelulares de ar, ocorrendo difusão pelos estômatos para a atmosfera que juntamente com a camada limite adjacente, fazem com que a folha regule a taxa de transpiração da planta que pode ocorrer também pela cutícula foliar através do estabelecimento de um gradiente de potencial da água desde o solo (ψ_{solo}), ar (ψ_{ar}) até a atmosfera ($\psi_{\text{atmosfera}}$), esta última altamente negativa que atua como dreno para o vapor d'água desde as raízes da planta até as folhas (PEREIRA et al., 2002).

A transpiração, assim como a evaporação direta, depende da radiação solar, temperatura do ar, déficit de pressão de vapor, velocidade do vento, teor de água no solo, salinidade da água, densidade, variedade, fase de crescimento e práticas de cultivo. Diferentes tipos de plantas podem ter diferentes taxas de transpiração, onde quase 100% da ET vem da evaporação na semeadura, enquanto que na cobertura total da colheita, mais de 90% da ET vem da transpiração (ALLEN et al., 1998).

Dependendo das condições da vegetação, tamanho da área vegetada e do suprimento de água no solo, define-se situações características de ET. A evapotranspiração de referência (ET_o) é um parâmetro climático que expressa o poder de evaporação da atmosfera em uma extensa

superfície vegetada coberta por grama, com altura entre 8 e 15 cm, em crescimento ativo, sem restrição hídrica. A evapotranspiração real (E_{Tr}) é aquela que difere das condições da evapotranspiração da cultura (E_{Tc}) ou máxima devido a condições não ótimas, com a presença de pragas, doenças, salinidade, baixa fertilidade do solo e estresse hídrico. A evapotranspiração de oásis (E_{To}) é aquela circundada por uma extensa área seca de onde provém energia por advecção (ALLEN et al., 1998).

A evapotranspiração de cultura (E_{Tc}) é o produto da evapotranspiração de referência (E_{To}) pelo coeficiente de cultura (K_c) que é um parâmetro relacionado a fatores ambientais e representa as características do vegetal, variando em função da arquitetura da planta, em seus distintos estádios de desenvolvimento (PEREIRA et al., 2002). Conhecer a ET e o coeficiente de cultivo (K_c) é fundamental para se outorgar, dimensionar e manejar a irrigação de uma cultura, uma vez que esses valores variam conforme a disponibilidade energética do local, variedade e idade da planta (SILVA et al., 2006).

Devido à dificuldade de obter medições de campo precisas, um grande número de equações empíricas e semi-empíricas foram desenvolvidas para avaliar a E_{Tc} e E_{To} a partir de dados meteorológicos por vários pesquisadores que avaliaram seus desempenhos para diferentes locais, sendo em maio de 1990, numa Consulta de Especialistas, oficializada a Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Penman-Monteith como método padrão para definição e cálculo da E_{To} . O tanque classe A provou seu valor prático e tem sido usado com sucesso para estimar a E_{To} , observando a perda de evaporação a partir de uma superfície de água, aplicando coeficientes empíricos para relacionar a evaporação do tanque com a E_{To} nas estações meteorológicas convencionais (ALLEN et al., 1998).

1.1.10 Estresse hídrico

Para Floss (2004) cerca de 90% da produção da planta ocorre em resposta à atividade fotossintética e para Singh (1995) a segunda maior causa de redução da produtividade é a deficiência hídrica, onde 60% da produção mundial de feijão vêm de regiões que vivem e o cultivam sobre essa condição.

O estresse hídrico que se desenvolve em qualquer situação particular na planta é resultado de uma completa combinação dos fatores do solo, planta e atmosfera, os quais interagem para controlar a taxa de absorção e a perda de água (VAADIA et al., 1961), ainda

que, de acordo com Gavande (1976) a resposta das plantas ao fator “água” pareça estar relacionada mais estreitamente com o potencial total de água no solo.

Para Larcher (2000) estresse é um desvio significativo das condições ótimas para a vida que induzem mudanças e respostas em todos os níveis funcionais do organismo podendo ser reversíveis e irreversíveis. Ele é um fator externo que exerce influência desvantajosa para a planta (TAIZ; ZEIGER, 2004) sendo a disponibilidade de água um dos fatores ambientais que mais influenciam na produtividade vegetal (SOUZA et al., 2004; BASTOS et al., 2012).

O déficit hídrico é o estresse ambiental que mais interfere no desenvolvimento das culturas agrícolas e dentre os principais mecanismos de adaptação na espécie estão o desenvolvimento do sistema radicular, alta condutividade hidráulica na raiz a fim de, maximizar a captação de água, o controle da abertura estomática e a redução da área foliar para minimizar as perdas de água (SUBBARAO et al., 1995),

A maneira como o déficit hídrico se desenvolve na planta é bastante complexa, pois afeta praticamente todos os aspectos de crescimento, incluindo modificações anatômicas, morfológicas, fisiológicas e bioquímicas (BEZERRA et al., 2003). A deficiência hídrica, provocada pela irregularidade das chuvas, altas temperaturas associadas a períodos críticos na fase de florescimento, provocam redução drástica do rendimento de grãos, aumento da respiração e redução da fotossíntese (BEAVER et al., 2003; MENDES et al., 2007).

O déficit hídrico reduz e inviabiliza o processo fotossintético, uma vez que a água é componente básica da reação e responsável pela manutenção da transpiração e da condutância estomática, essencial para a entrada do gás carbônico no mesófilo foliar (BUCHANAN et al., 2000).

O crescimento de um vegetal depende em termos gerais da divisão, do desenvolvimento e da expansão celular, processos sensíveis ao estresse hídrico, principalmente na fase de alongamento celular. Depois desta fase, a célula se encontra preparada para expandir, bastando que haja pressão hidrostática interna ou de turgor (NÓBREGA, 2001). Resende et al. (1981) relataram que plantas submetidas a tensões hídricas reduzem a turgescência e conseqüentemente, a expansão celular, o que promove redução no alongamento do caule e da folha.

A água além de ser o principal constituinte do protoplasma, participa diretamente de inúmeras reações químicas responsáveis pela turgescência celular. A redução da absorção de água e a conseqüente desidratação das células, comprometem os processos fisiológicos afetando assim todos os componentes de crescimento (PÁEZ et al., 1995). A perda acentuada

de água reduz a multiplicação e o alongamento das células, resultando em plantas menores e, com consequência na redução da área foliar.

A limitação na área foliar pode ser considerada uma primeira reação das plantas ao déficit hídrico (TAIZ & ZEIGER, 1991). Para Fernández et al. (1996) a área foliar é um importante fator da produção e determina o uso da água pela planta e seu potencial de produtividade é severamente inibido quando exposta ao déficit hídrico.

Para Babalola (1980), a translocação de fotoassimilados para as raízes é comprometida em condições de déficit hídrico, afetando diretamente o crescimento das plantas. De maneira geral, melhores produções em grandes culturas são obtidas através do sucesso da regulação nas relações fonte-dreno, ou seja, na produção e utilização dos fotoassimilados (ZAMSKI & SCAFFER, 1996).

Para Leite et al. (1999) considerando que as folhas são os centros de produção da fotossíntese e que o resto da planta depende da exportação de material assimilado da folha para outros órgãos da planta de feijão-caupi, o estresse hídrico nesta cultura, compromete tal exportação, contribuindo para os decréscimos de seu crescimento e produção.

Estudando o crescimento de plantas sob estresse hídrico, Kramer (1983) relata que a falta de água promove múltiplos efeitos sobre o metabolismo vegetal como a redução fotossintética pelo fechamento dos estômatos, resultando a diminuição no suprimento de dióxido de carbono, redução da translocação de carboidratos e dos reguladores de crescimento provocando distúrbios no metabolismo do nitrogênio.

Plantas sob deficiência hídrica têm usualmente sua área foliar e produção de matéria seca reduzidas (TURK et al., 1980; SINGH, 1989). Trabalhando com plantas de feijão *Phaseolus*, Bonanno e Mack (1983) observaram o efeito de diferentes níveis de irrigação no desenvolvimento da cultura e verificaram que a massa seca total de plantas e folhas, a área foliar, a área média por folha e o número de folhas por planta diminuíram com o aumento do déficit de água do solo.

Rivas et al. (2016) estudando o comportamento da fotossíntese em duas cultivares de feijão-caupi em condições de água disponível, seca e em recuperação, observaram que após 10 dias de déficit hídrico, o potencial hídrico foliar da cultivar tolerante foi mais intenso do que na cultivar sensível, as trocas gasosas foliares e os parâmetros de clorofluorescência decresceram mais rapidamente na cultivar sensível em relação à tolerante e após 48 h de reidratação, as plantas de estresse de ambas as cultivares não recuperaram as taxas máximas de carboxilação, a taxa máxima de transporte de elétrons impulsionando a regeneração e a capacidade fotossintética da enzima Ribulose-1,5-bisfosfato (RuBP). Sendo que, a cultivar tolerante

recuperou todos os parâmetros fotossintéticos mais rapidamente que a cultivar sensível após 60 h de reidratação.

1.1.11 Fatores de Resposta K_y e K_{ss}

A maioria das culturas possui períodos críticos quanto à deficiência hídrica, durante os quais a falta de água causa sérios decréscimos na produção final e os prejuízos causados dependem da sua duração, severidade e do estágio de desenvolvimento da planta que ocorre (FOLEGATTI et al., 1997). Há indícios de que ocorrerá incremento de 7,5 e 12,8% do consumo de água pelo feijão-caupi para as próximas décadas devido as possíveis alterações climáticas (SARAIVA; SOUZA, 2012).

Para a introdução de novas práticas ou mesmo para se saber qual o impacto da ocorrência de secas nas lavouras, há forte necessidade de se quantificar tal efeito na produção. O K_y é o fator de resposta da produção ou coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico que descreve a redução no rendimento relativo ($1-Y_r/Y_m$) de acordo com a redução relativa da evapotranspiração da cultura ($1-E_{tr}/E_{tm}$) causado pela redução de água no solo descritos de acordo com a equação 2 (ALLEN et al., 1998).

O modelo de Stewart et al. (1977) de estimativa da produtividade de culturas agrícolas em resposta a diferentes quantidades de água aplicada (Equação 2), aborda a relação entre o rendimento das culturas e o uso da água, propondo uma equação simples que se baseia na relação linear entre a produtividade e a evapotranspiração das culturas aplicada mundialmente. Esta abordagem e os procedimentos de cálculo para estimar a resposta de rendimento da água foram publicados no Jornal de Irrigação e Drenagem da FAO nº 33 por Doorenbos e Kassam (1979) que foi um marco e amplamente utilizado em todo o mundo para uma ampla gama de aplicações.

$$(1-Y_r/Y_m) = K_y (1-E_{tr}/E_{tm}) \quad (2)$$

Em que:

Y_r - rendimento real obtido (kg ha^{-1});

Y_m - rendimento potencial (kg ha^{-1});

K_y - coeficiente de resposta da cultura;

E_{tr} - evapotranspiração real (mm);

E_{tm} - evapotranspiração máxima potencial total (mm).

O rendimento máximo da cultura (Y_m) é obtido numa variedade altamente produtiva e bem adaptada à um ambiente de crescimento, em condições de não limitação de fatores como água com evapotranspiração máxima, nutrientes, pragas e doenças durante todo seu crescimento e desenvolvimento, o oposto ao rendimento e evapotranspiração real (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

Os fatores de resposta captam e integram a essência das ligações complexas entre produção e uso de água por uma cultura, onde muitos processos biológicos, físicos e químicos estão envolvidos (STEDUTO et al., 2012). Os efeitos do manejo da irrigação sobre a produtividade do feijão-caupi no ciclo total (K_y) e em cada fase fenológica específica (K_{ss}) permite o planejamento, dimensionamento e operação das áreas irrigadas, onde o produtor pode avaliar o efeito da lâmina de irrigação e definir sua utilização objetivando rendimento e produção total da cultura (CORDEIRO et al., 1998).

Doorenbos e Kassam (1979) realizaram a classificação das culturas quanto à sensibilidade ao estresse hídrico em quatro categorias: baixo ($K_y < 0,85$); baixo/médio ($0,85 < K_y < 1,00$); médio/alto ($1,00 < K_y < 1,15$) e alto ($K_y > 1,15$).

A classificação para Steduto et al. (2012) pode ser compreendida ainda como: $K_y > 1$: resposta da cultura é muito sensível ao déficit hídrico com reduções de rendimento proporcionalmente maiores quando o uso da água é reduzido por causa do estresse; $K_y < 1$: a cultura é mais tolerante ao déficit hídrico e se recupera parcialmente do estresse, exibindo reduções proporcionais no rendimento com o uso reduzido de água; $K_y = 1$: a redução de rendimento é diretamente proporcional ao uso reduzido de água.

Doorenbos e Kassam (1994) utilizando o modelo de Stewart determinaram os valores de K_y para o período total de crescimento e para os diferentes estádios de desenvolvimento de várias culturas, a partir da avaliação de inúmeros resultados de pesquisa encontrados na literatura, abrangendo ampla faixa de condições de crescimento, sendo importante determinar esses valores para cada local devido a variabilidade e especificidades edafoclimáticas (KABOOSI e KAVEH, 2010).

Segundo Lima et al. (2006) o feijoeiro é classificado como planta sensível, tanto à deficiência hídrica quanto ao excesso de água no solo. A fase reprodutiva é a mais sensível à seca onde a planta responde diminuindo a área fotossinteticamente ativa, a translocação de fotoassimilados para a formação e polinização das flores e abscisão dos órgãos reprodutivos (KRAMER et al., 1995; SINGH, 1995; GUIMARÃES et al., 1996).

Sousa et al. (2009) verificaram reduções nos componentes de produção no feijoeiro e que o estresse hídrico é mais severo nas fases de floração e frutificação. Outros trabalhos

indicam que os estádios de floração e enchimento de grãos do feijão são os mais críticos ao déficit hídrico (SHOUSE et al., 1981; FERREIRA et al., 1991; FIEGENBAUM et al., 1991; BRITO, 1993; GUIMARÃES et al., 1996; ANDRADE et al., 1999).

Leite e Virgens Filho (2004) pesquisando os efeitos do déficit hídrico na produção de vagens do feijão-caupi cv. EMEPA-281 em diferentes estádios de desenvolvimento, observaram que a duração do período estressado é mais importante do que a época de ocorrência do déficit hídrico tanto na fase vegetativa quanto na fase reprodutiva, que resultou em progressiva redução da matéria seca total, de folhas, flores e frutos, evidenciando que a planta possui a estratégia de um período de repouso fisiológico. Eles ainda constataram que a recuperação da planta se dá pela intensa emissão de novas folhas e botões florais, ratificando a adaptação do feijão-caupi em condições adversas e que tem capacidade de retomar suas atividades após o fim do período estressado.

Nóbrega et al. (2001) disseram que a redução da umidade no solo influenciou os processos fisiológicos com diminuição do crescimento foliar, inibição da atividade fotossintética, limitando o rendimento da cultura. De acordo com Karamanos et al. (1982) a ocorrência de estresse hídrico durante a fase vegetativa inicial, provoca redução do crescimento e da superfície fotossintética, ocorrendo conseqüentemente, menor número de flores, de vagens por planta e de grãos por vagens. Ritchie (1981) afirma que além de afetar a expansão foliar, a deficiência hídrica do solo pode causar o enrolamento e abscisão ou morte parcial das folhas, diminuição da brotação, polinização, translocação, enchimento de grãos e abortamento das vagens.

Mendes et al. (2007) em casa de vegetação analisando as alterações na relação fonte-dreno no feijão-caupi cultivares Epace 10 e Seridó com deficiência hídrica nas fases vegetativa e reprodutiva, concluíram que o potencial hídrico foliar, condutância estomática e a transpiração sofreram redução aos 29 e 52 dias após a semeadura, tendo as plantas capacidade de recuperação após o estresse no período vegetativo, o que não influenciou na capacidade de fonte (número de folhas, área foliar e área foliar específica) e na eficiência reprodutiva, mas reduziu o tamanho do dreno (número de vagens, número e peso de sementes/planta). Eles ainda observaram que, quando aplicado na fase vegetativa, o estresse inibiu o processo de abscisão foliar e o potencial de dreno da planta (flores/planta), já na fase reprodutiva o estresse causou grande redução na relação produção de sementes/área foliar em ambos os cultivares.

Nascimento et al. (2004) estudando o efeito de 40, 60, 80 e 100 % de redução da água no solo sobre o crescimento e produção do feijão-caupi cv. IPA 206 encontraram reduções para os tratamentos de 60 e 40 % no comprimento da haste principal (26 e 48%), número de folha

por planta (23 e 35%), número de vagem por planta (32 e 49%) e massa de vagem por planta (23 e 30%), especialmente sobre o número de vagens por planta com mais severidade, evidenciando-se ser este um mecanismo importante de resistência a seca.

Bezerra et al. (2003) pesquisando sobre o comportamento do feijão-caupi cv. Epace-11 sob déficit hídrico, aplicando metade da lâmina usada na testemunha em Fortaleza, encontraram que o estágio de enchimento de grãos foi o mais sensível ao déficit hídrico com uma redução de 26,2 % em relação à testemunha e redução de 59% da produção de grãos no ciclo todo, sendo o número médio de vagens por planta e o número de grãos por vagem afetados pela deficiência hídrica, mas o tamanho médio das vagens e o peso de 100 grãos não foram afetados. Oliveira (1987) concluiu que a aplicação do déficit hídrico nas fases de crescimento, floração e de frutificação causou redução de 31,2%; 10,8% e 51,8% na produção de grãos, respectivamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRIANUAL. Anuário Estatístico da Agricultura brasileira. São Paulo: FNP Consultoria & Comércio, 2013. 532 p.

ALBUQUERQUE, P. E. P. D.; DURÃES, F. O. M. **Uso e manejo de irrigação**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 528 p.

ALBUQUERQUE, P. E. P.; ANDRADE, C. L. T. **Planilha eletrônica para a programação da irrigação de culturas anuais**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2001. 14p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular técnica, 10).

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO – Irrigation and Drainage Paper, 56).

AMPOFO, E.A. Soil moisture dynamics in Coastal Savanna soils in the tropics under different soil management practices. **Hydrological Science**, v.51, p.1194-1202, 2006.

ANA. Agência Nacional de Águas (Brasil). **ATLAS Irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/AtlasIrigacaoUsodaAguanaAgriculturaIrigada.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2018.

ANDRADE JÚNIOR, A. S. **Viabilidade da irrigação, sob risco climático e econômico, nas microrregiões de Teresina e Litoral Piauiense**. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2000.

ANDRADE JUNIOR, A. S.; SANTOS, A. A. dos; ATHAYDE SOBRINHO, C.; BASTOS, E. A.; MELO, F. de B.; VIANA, F. M. P.; FREIRE FILHO, F. R.; CARNEIRO, J. da S.; ROCHA, M. de M.; CARDOSO. M. J.; SILVA, P. H. S. da; RIBEIRO, V. Q. **Cultivo de feijao-caupi**

(*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). Teresina: Embrapa-Meio Norte, 2002. 110 p. (Embrapa Meio-Norte. Sistema de Produção, 2).

ANDRADE, E. M.; PEREIRA, O. J.; CRUZ, M. G. M. Resposta da cultivar BR-1 de caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), submetido a diferentes deficiências hídricas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA Agrícola, 28, 1999, Pelotas. **Resumos...**: SBEA, 1999.

ARAÚJO, J. P. P. de; SANTOS, A. A. dos; CARDOSO, M. J.; WATT, E. E. Nota sobre a ocorrência de uma inflorescência ramificada em caupi *Vigna unguiculata* (L.) Walp. Subsp. unguiculata no Brasil. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v.12, n.1/2, p.187 - 193, 1981.

ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M. Continuidade e distribuição espacial da umidade do solo em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.14, n.12, p.1257–1266, Campina Grande, PB. 2010.

AZEVEDO, B. M.; FERNANDES, C. N. V.; PINHEIRO, J. A.; BRAGA, E. S.; CAMPÊLO, A. R.; DE ARAÚJO VIANA, T. V.; MARINHO, A. B. Efeitos de lâminas de irrigação na cultura do feijão vigna de cor preta. **Agropecuária Técnica**, 32 (1), 152-159, 2011.

BABALOLA, O. Water relations of three cowpeacultivars [*Vigna unguiculata* (L.) Walp]. **Plant and Soil**, v.56, p.59-69, 1980.

BASSEGIO, D.; SANTOS, R. F.; SECCO, D.; SOUZA, S.N.M.; JUNIOR, L. A. Z.; JADOSKI, S. O.; Variação do nível do lençol freático no crescimento de plantas daninhas. **Revista Cultivando o Saber**. Cascavel, v.5, n.1, p.146-157, 2012.

BASTOS, E. A.; RAMOS, H. M. M.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; NASCIMENTO, F. N.; CARDOSO, M. J. Parâmetros fisiológicos e produtividade de grãos verdes do feijão-caupi sob déficit hídrico. **Water Resources and Irrigation Management**. v.1, n.1, p.31-37, 2012.

BASTOS, E.; FERREIRA, V.; SILVA, C.; ANDRADE JÚNIOR, A. de. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do feijão-caupi no Vale do Gurguéia, Piauí. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n.2. p. 182-190, 2008.

BEAVER, J. S.; ROSAS, J. C.; MYERS, J.; ACOSTA, J.; KELLY, J. D.; NCHIMBI-MSOLLA, S.; MISANGU, R.; BOKOSI, J.; TEMPLE, S.; ARNAUD-SANTANA, E.; COYNE, D. P. Contributions of the bean/cowpea CRSP to cultivar and germplasm development in common bean. **Field Crop Research**, Amsterdam, v. 82, n. 2-3, p. 2-3, 2003.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS; Ascar, 2014. 84 p.

BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. 5. ed. Viçosa: MG, UFV, Impr. Univ., 1989. 596 p.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8.ed. Viçosa: UFV, 2006, 625p.

BEZERRA, A. A. C.; TÁVORA, F. J. A. F.; FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q. Morfologia e produção de grãos em linhagens modernas de feijão-caupi submetidas a diferentes

densidades populacionais. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, João Pessoa, v. 8, n.1, p. 85-93, 2008.

BEZERRA, A. K. P.; LACERDA, C. F. de; HERNANDEZ, F. F. F.; SILVA, F. B. da; GHEYI, H. R. Rotação cultural feijão caupi/milho utilizando-se águas de salinidades diferentes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.5, p.1075-1082, mai, 2010.

BEZERRA, F. M. L., ARARIPE, M. A. E., TEÓFILO, E. M.; CORDEIRO, L. G.; SANTOS, J. J. A. Feijão caupi e déficit hídrico em suas fases fenológicas. **Revista Ciência Agronômica**, v. 34, n.1. 2003.

BONANNO, A. R.; MACK, H. J. Water relations and growth of snap beans as influenced by differential irrigation. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v.108, p.837-44, 1983.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 14th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2008.

BRITO, J. A. P. de. **Respostas de caupi (*Vigna unguiculada* (L.) Walp.) a diferentes períodos de deficiência hídrica**. 1993. 125f. Dissertação. (Mestrado em Fitotecnia) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

BUCHANAN, B. B.; GRUISSEM, W.; JONES, R. L. Biochemistry & molecular biology of plants. Rockville: **American Society of Plant Physiologists**, 1408p. 2000.

BUZETTI, S.; SÁ, M. E. de; KATAQUE, R. F.; TAMAKI, K.; FRANCO, L. G. B.; ARF, O. Efeitos de fontes, doses e épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura sobre a produção e qualidade de sementes de feijão II "Carioca 80" In: **Anais... III REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO**, maio 1990, Vitória, Resumos, 1990 .p.220.

CALVACHE, A. M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S. Efeito de épocas de deficiência hídrica na evapotranspiração atual da cultura do feijão cv. Imbabello. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.55, n.3, p.485-497, 1998.

CÂMARA, G. M. S. **Como a planta de soja se desenvolve**. Arquivo do Agrônomo. Trad. D. RICHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; THOMPSON, H. E.; BENSON, G. O. n. 11, p.1-21, 1997.

CARDOSO, M. J. et al. **Avaliação agroeconômica da produção de sementes de caupi sob irrigação**. Teresina: Embrapa- CPAMN, 1995. (Comunicado técnico, 62).

CARDOSO, M. J.; MELO, F. B.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; LIMA, M. G. **Clima e aspectos de plantio**. In: **CARDOSO, M. J. (Org.) A cultura do feijão-caupi no Meio-Norte do Brasil**. Teresina: Embrapa/Meio-Norte, 264p. (Circular técnica, 28), 2000.

CARVALHO, J. A.; PEREIRA, G. M.; ANDRADE, M. J. B.; ROQUE, M. W. Efeito do déficit hídrico sobre o rendimento do feijão caupi [*Vigna unguiculata* (L.) Walp]. **Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, v.24, n.3, p.710-717, 2000.

CHAVES, M. M. et al. How plants cope with water stress in the field. Photosynthesis and growth. **Annals Botany**, Oxford, v. 89, n. 7, p. 907-916, 2002.

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

CINTRA, F. L. D.; LIBARDI, P. L.; SAAD, A. M. Balanço hídrico no solo para porta-enxerto de citros em ecossistema de Tabuleiro Costeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.1, p.23-28, 2000.

COELHO, E. F.; VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; LEDO, C. A. S. (2006). Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. n. 30. p. 23-30.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Sétimo levantamento Acompanhamento da safra brasileira de grãos da Safra 2017/18**. v. 7, Brasília, CONAB, abril 2018. p. 1-139.

CORDEIRO, L. G.; BEZERRA, F. M. L.; SANTOS, J. J. A.; MIRANDA, E. P. Fator de sensibilidade ao déficit hídrico da cultura do feijão Caupi (*Vigna unguiculata* (L). Walp.). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.2, n.2, p.153-157. 1998.

COSTA FILHA, C. L. **Avaliação da potencialidade das terras para determinação de zonas agroecológicas, no município de Igarapé-Açu, Pará**. 2005. 118 p. (Dissertação, Faculdade de Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2005.

DAMASCENO, S. K. J. Produção, avanços e desafios para cultura do Feijão- Caupi no Brasil. In: CONGRESSO NACIONAL DE FEIJÃO-CAUPI, 2; Reunião Nacional de Feijão-Caupi, 7., Belém, PA. Da agricultura de subsistência ao agronegócio: **Anais...** Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2009.

DAVIS, J.L.; CHUDOBIAK, W.J. In-situ meter for measuring relative permittivity of soils. Geology Survey of Canada, Paper 75- 1A, p.75-79, 1975.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994.306p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage paper 33**, FAO, Rome, Italy, 1979. p. 193.

DUTRA, C.C.; PRADO, E.A.F.; PAIM, L.R.; SCALON, S.P.Q. Desenvolvimento de plantas de girassol sob diferentes condições de fornecimento de água. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.33, suplemento 1, p.2657-2668, 2012.

EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL. Cultivar de Feijão Caupi: BR3 – Tracuateua purificada para o estado do Pará. Ano 2005. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/br3tracuateua_000fljvhfns02wyiv80lcx0a9xtkboga.pdf>. Acesso em: 23 set. 2017.

EMBRAPA MEIO NORTE. Cultivo do feijão-caupi. Sistemas de Produção, 2. Versão Eletrônica. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Feijao/FeijaoCaupi/autores.htm>> 2003. Acesso em: 30 jun. 2017.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. A importância econômica do feijão caupi, 2015. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/feijaocaupi/arvore/CONTAG01_14_510200683536.html>. Acesso em: 15 set. 2017.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Feijão-caupi. Versão eletrônica. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/feijaocaupi/arvore/CONTAG01_33_510200683536.html>. Acesso em: 29 set. 2018.

FAO. Water in agriculture: opportunity untapped. Rome: food and agriculture organization of the united nations, 2015. Disponível em: <<http://www.fao.org/publications/en/>>. Acesso: 7 jul. 2016.

FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations.prodstat – Crops. 2015. Disponível em: <http://faostat3.fao.org/home/index_es.html?locale=es#DOWNLOAD>. Acesso em: 09 set. 2017.

FAPESPA. 2015. Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas do Pará. Boletim Agropecuário do estado do Pará 2015. Disponível em:<http://www.fapespa.pa.gov.br/sites/default/files/Boletim_Agropecuario_do_Estado_do_Para_2015.pdf>. Acesso: 4 nov. 2016.

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. Water demand, crop coefficient and decoupling factor of cowpea in the eastern Amazon. **Revista Caatinga**, 2017.

FELLNER-FELDEGG, J. The measurement of dielectrics in the time domain. **Journal of Physical Chemistry**, Washington, v. 78, p. 616-623, 1969.

FERNÁNDEZ, C. J.; MCINNES, K. J.; COTHREN, J. T. Water status and leaf area production in water - and nitrogen-stressed cotton. **Crop Science**, Madison, v.36, p.1224-1233, 1996.

FERREIRA, L. G. R.; COSTA, J. O.; ALBUQUERQUE, I. M. de. Estresse hídrico nas fases vegetativa e reprodutiva de duas cultivares de caupi. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, n.7, p.1049-55, 1991.

FIGENBAUM, V.; SANTOS, D. S. B. dos; MELLO, V. D. C.; SANTOS FILHO, B. G. dos; TILLMANN, M. A. A.; SILVA, J. B. Influência do déficit hídrico sobre os componentes do rendimento de três cultivares de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, n.2, p.275-80, 1991.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas**. Passo Fundo: UPF, 2004.

FREIRE FILHO, F. R. et al. Adaptabilidade e estabilidade da produtividade de grãos de caupi enramador de tegumento mulato. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n.5, p.591-598, 2003.

FREIRE FILHO, F. R. **Feijão-caupi no Brasil: Produção, melhoramento genético, avanços e desafios**. Teresina, EMBRAPA Meio Norte, 84p. 2011.

FREIRE FILHO, F. R.; LIMA, J. A. A.; RIBEIRO, V. Q. (Ed.). **Feijão caupi: avanços tecnológicos**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p. 191-210, 2005.

FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q.; ROCHA, M. M.; LOPES, A. C. A. Adaptabilidade e estabilidade produtiva de genótipos de feijão-caupi. **Revista Ciência Rural**, v.35, p.24-30, Ano 2005.

FREIRE FILHO, F. R.; ROCHA, M. de M.; SILVA, K. J. D.; RIBEIRO, V. Q.; NOGUEIRA, M. do S. da R. Feijão-Caupi: Melhoramento genético, resultados e perspectivas. In: simpósio nordestino de genética e melhoramento de plantas, Fortaleza. O melhoramento genético no contexto atual. **Anais...** Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical/UFC. p. 25-59. 2009.

FREIRE, A. L. D. O. **Efeitos do déficit hídrico sobre alguns aspectos biofísicos, bioquímicos e no desenvolvimento do feijão-vagem (Phaseolus vulgaris L.)**. Lavras: ESAL, 1990. 86p. (Dissertação. Mestrado em Fisiologia Vegetal).

FROTA, A. A. A.; PEREIRA, P. R. Caracterização do feijão-caupi na região meio-norte do Brasil. In: CARDOSO, M. J. (Org.). **A cultura do feijão-caupi no meio-norte do Brasil**. Teresina: EMBRAPA Meio-Norte, 264p. 2000.

FUSCALDI, K. C.; PRAD, R. G. Análise econômica da cultura do feijão. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v.1, p.18-30, 2005.

GARZELLA, T. C.; MOLIN, J. P. **Calibração em campo de um TDR para determinação de umidade**. 2004. 14 p. – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP, 2004.

GAVANDE, S. A. **Física de suelos, principios e aplicaciones**. 2ed. México: Ed. Limusa, 1976. 351 p.

GEPTS, P.; FERNÁNDEZ, F. **Etapas de desarrollo de la planta de frijol común (Phaseolus vulgaris L.)**. Cali: CIAT, 1982. 10 p. fisiológicos das culturas. Brasília: EMBRAPA-DPU, 423 p. p. 397 409. Ano 1989.

GONZALEZ-DUGO, V.; DURAND, J.; GASTAL, F. Water deficit and nitrogen nutrition of crops. A review. *Agronomy Sustainable Development*, **Baghdad**, v. 30, n. 3, p. 529-544, 2010.

GUIMARÃES, C. M.; STEINMETZ, S.; PORTES e CASTRO, T. de A. Uso de microlisímetros na determinação da evapotranspiração do feijoeiro da seca. In: Reunião Nacional de Pesquisa de Feijão 1, 1982, Goiânia. **Anais**. Goiânia, EMBRAPA-CNPAF, 1982. p.133-137.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; BRUNINI, O. Adaptação do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) à seca. II. Produtividade e componentes agronômicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.31, n.7, p.481-488, 1996.

HARTMANN, D. L. **Global physical climatology**. New York: Academic Press, 1994. 411p.

HERRMANN JÚNIOR, P. S. P. **Construção de um equipamento para medida de umidade do solo através de técnica de micro-ondas**. São Carlos: USP, 1993. 124 p. Dissertação de Mestrado.

HILLEL, D. **Solo e água: Fenômenos e princípios físicos**. Porto Alegre: UFRGS, Departamento de Solos, 1970. 231p.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo agropecuário, 2017. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=73093>. Acesso em: 24 jan. 2019.

JOAQUIM JÚNIOR, G. O. **Desempenho do reflectômetro no domínio do tempo na detecção de variações de umidade de solo**. Piracicaba, 2003. 81 p. Dissertação (mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2003.

KABOOSI, K.; KAVEH, F. Sensitivity analysis of Doorenbos and Kassam (1979) crop water production function. **African Journal of Agricultural Research**, v. 5, n. 17, p. 2399-2417, september, 2010.

KARAMANOS, A. J.; ELSTON, J.; WADSWORTH, R. M. Water stress and leaf growth of field beans (*Vicia faba*, L.) in the field: water potentials and lamina expansion **Annals of Botany**, v.49, n.6, p.815-826, 1982.

KLAR, A.E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. São Paulo: Nobel, 1984. 408p.

KLEIN, V. A. Física do solo. Passo Fundo: Ediupf, 2008.

KRAMER, P. J. Water relations of plants. New York: **Academic Press**, 1983. cap.6, p.146-186: Development of root system.

KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. Water relations of plants and soils. San Diego: **Academic Press**, p. 495, 1995.

LANGYINTUO, A. S.; LOWENBERGDEBOER, J.; FAYE, M.; LAMBERT, D.; IBRO, G.; MOUSSA, B.; KERGA, A.; KUSHWAHA, S.; MUSA, S.; NTOUKAM, G. Cowpea supply and demand in west and central Africa. **Field Crops Research**, v.82 p.215231, 2003.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. Tradução de C. H. B. A. Prado e A. C. Franco. São Carlos: RiMa, 2000. 533p.

LEDIEU, J.; DE RIDDER, P.; DE CLERCK, P. & DAUTREBANDE, S. A method for measuring soil water moisture by time-domain reflectometry. **J. Hydrol.**, 88:319-328, 1986.

LEITE, M. L.; RODRIGUES, J. D.; MISCHAN, M. M.; VIRGENS FILHO, J. S. Efeitos do déficit hídrico sobre a cultura do caupi [*Vigna unguiculata* (L.) Walp], cv. EMAPA-821. II - Análise de Crescimento. **Revista de Agricultura**. Piracicaba, v.74, n.3, p.351-370, 1999.

LEITE, M. L.; VIRGENS FILHO, J. S. Produção de matéria seca em plantas de caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) submetidas a déficits hídricos. **Ciências Exatas e da Terra, Ciências Agrárias e Engenharias**, Ponta Grossa, v. 10, n. 1, p. 43-51, 2004.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Edusp, 2005.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 2.ed. Piracicaba, ESALQ, 2000. 509p.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba, 1995. 497p.

LIMA FILHO, A. F. L.; COELHO FILHO, M. A.; HEINEMANN, A. B. Calibração e avaliação do modelo CROPGRO para a cultura do feijão caupi no Recôncavo Baiano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, p.1286-1293, 2013.

LIMA, J. G. A.; OLIVEIRA, A. S. de; SOUZA, L. da S.; SILVA, N. D. da; VIANA P. C. Calibration of a soil moisture sensor with disturbed and undisturbed soil samples from Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.22, n.10, p.696-701, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n10p696-701>

LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOARES, W. A.; SOUZA, E. S.; LIRA, C. A. B. O. Balanço hídrico no solo cultivado com feijão caupi. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.1, p.89-95, 2006.

LOOR, G. P. de. Dielectric properties of heterogeneous mixture. **Applied Scientific Research**, Dordrecht, v. B3, p. 479-482, 1964.

MALICKI, M. A.; PLAGGE, R. & ROTH, C. H. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil. **Eur. J. Soil. Sci.**, 47:357- 366, 1996.

MAÑAS, F. M. S. O.; VALERO, J. A. J. Agronomía del riego. Madrid: **Mundi-Prensa**, 1993. 732p.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3. ed. atual. Viçosa: Ed. UFV, 2009. 355p.

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

MENEZES JUNIOR, J. A. N. de; SILVA, K. J. D. e; ROCHA, M. de M. Cultivo de Feijão-Caupi. Dados Sistema de Produção Versão Eletrônica 2ª edição. Mar/2017. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1071700/1/SistemaProducaoCaupiCapituloImportanciaEconomica.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2018.

MOSTASSO, L.; MOSTASSO, F. L.; DIAS, B. G.; VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M. Selection of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) rhizobial strains for the Brazilian Cerrados. **Field Crops Research**, 2002

MOUSINHO, F. E. P.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; FRIZZONE, J. A. Viabilidade econômica do cultivo irrigado do feijão-caupi no Estado do Piauí. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.30, p.139-145, 2008.

MUÑOZ-CARPENA, R.; RITTER, A.; BOSCH, D. Field methods for monitoring soil water status. In: MUÑOZ-CARPENA, R.; BENEDÍ, J.A. (Ed). **Soil-water-solute process characterization: an integrated approach**. CRC Press, 2005, p.167-193.

MURGA-ORRILLO, H.; ARAUJO, W. F.; ROCHA, P. R. R.; SAKAZAKI, R. T.; DIONISIO, L. F. S.; VARGAS, A. R. P.; Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do feijão-caupi cultivado em solo do cerrado submetido à cobertura morta. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 1, p. 172-187, janeiro-março, 2016.

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

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

NICOLI, C. M. L.; HOMMA, A. K. O.; CRAVO, M. S. FERREIRA, C. A. P. **Sistema de produção de feijão-caupi e mandioca na Mesorregião Nordeste Paraense: análise econômica**. Documento nº 276. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2006. 59p.

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

OLIVEIRA, A. P.; ARAÚJO, J. S.; ALVES, E. U.; NORONHA, M. A. S.; CASSIMIRO, C. M.; MENDONÇA, F. G. Rendimento de feijão caupi cultivado com esterco bovino e adubo mineral. **Horticultura Brasileira**. Brasília, v.19, n.1, p.81-84, 2001.

OLIVEIRA, G. A. et al. Resposta do feijão-caupi as lâminas de irrigação e as doses de fósforo no cerrado de Roraima. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 42, n. 4, p. 872-882, 2011.

OLIVEIRA, M. S. de **Efeito do déficit hídrico aplicado em diferentes fases do ciclo fenológico do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Eriparsa**. Lavras: ESAL, 1987. 60 p. (Dissertação. Mestrado em Fitotecnia).

ONOFRE, A. V. C. **Diversidade genética e avaliação de genótipos de feijão-caupi contrastantes para resistência aos estresses bióticos e abióticos com marcadores SSR, DAF e ISSR**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

OR, D. & WRAITH, J.M. **Agricultural and environmental soil physics**. Logan, Utah State University, 1997. 218p.

PÁEZ, A.; GONZÁLES, M. E.; YRAUSQUÍN, O. X. Water stress and clipping management effects on guinea grass: I. Growth and biomass allocation. **Agronomy Journal**, Madison, v.87, p.698-706, 1995.

PALTINEANU, I. C.; STARR, J. L. Real-time soil water dynamics using multisensory capacitance probes: laboratory calibration. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison-WI, v.61, p.1576-1585, nov-dec, 1997.

PATANÈ, C.; TRINGALI, S.; SORTINO, O. Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions. **Scientia Horticulturae** **129**, 590–596. 2011. doi:10.1016/j.scienta.2011.04.030

PAZ, V. P. S. et al. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, set/dez. 2000.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

REBELLO, F. K. Conjuntura da produção e comercialização do feijão-caupi no nordeste paraense: Safra 2010. Disponível em: <http://www.bancoamazonia.com.br/bancoamazonia2/includes%5Cinstitucional%5Carquivos%5Cbiblioteca%5Ccontextoamazonico%5Ccontexto_amazonico_18.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2014.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 188 p.

REICHARDT, K. **Processo de transferência no sistema solo-água-atmosfera**. 4 ed. Campinas: Fundação Gargill, 1985.466p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Editora Manole, 2004. 478 p.

RESENDE, M.; HENDERSON, D. W. FERERES, E. Frequência de irrigação e produção de feijão Kidney. **Pesquisa Agropecuaria Bras.**, Brasília. 16, n.3, p.363-370, 1981.

RIBEIRO, R. V. et al. Photochemical heat-shock response in common bean leaves as affected by previous water deficit. **Russian Journal of Plant Physiology**, Moscow, v. 55, n. 3, p. 350358, 2008.

RITCHIE, J. T. Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. **Plant and Soil**, v.58, p.81-96,1981.

RIVASA, R.; FALCÃO, H. M.; RIBEIRO, R.V.; MACHADO, E.C.; PIMENTEL, C.;

ROTH, C. H.; SCHULIN, R.; FLUHLER, H. & ATTINGER, W. Calibration of time-domain reflectometry for water content measurement using composite dielectric approach. **Water Res. Res.**, 26:2267-2273, 1990.

SABOYA, R. C. C.; BORGES, P. R. S.; SABOYA L. M. I.; MONTEIRO F. P. R.; SOUZA, S. E. A.; SANTOS, A. F.; SANTOS, E. R. Response of cowpea to inoculation with nitrogen-fixing strains in Gurupi-Tocantins State. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**. v. 4, n.1, p. 40-48, Feb. 2013.

SANTOS, M. A. S. dos; REBELLO, F. K. Perfil socioeconômico e tecnológico dos pequenos produtores de feijão-caupi do município de Primavera, Nordeste do Pará – Brasil. **Revista Verde (Mossoró – RN)**, vol. 7, n. 5, p.72 – 82, jan-dez, 2012.

SANTOS, M. A. S.; REBELLO, F. K.; HOMMA, A. K.O. Fontes de crescimento da produção de feijão-caupi no Estado do Pará, no período de 1998-2008. In: **Anais...** Congresso Brasileiro de Feijão-Caupi. Belém, Embrapa Amazônia Oriental, 24 a 28 de agosto de 2009.

SANTOS, M. R.; ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A. Influência do tipo de amostragem na constante dielétrica do solo e na calibração de sondas TDR. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. v.34 n. 02 p. 299-307, 2010.

SANTOS, M.G. Drought tolerance in cowpea species is driven by less sensitivity of leafgas exchange to water deficit and rapid recovery of photosynthesis after rehydration. **South African Journal of Botany** **103**. 2016. 101–107p. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sajb.2015.08.008>

SARAIVA, R. E SOUZA, F. O efeito das mudanças climáticas nas necessidades hídricas do feijão-caupi no curu-pentecoste utilizando o modelo “ISAREG”. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 6, n. 1. p. 8-13. 2012.

SEDAP. SECRETARIA DE ESTADO DE DESENVOLVIMENTO AGROPECUÁRIO E DA PESCA. **PANORAMA AGRÍCOLA DO PARÁ 2010/2017 (Feijão)**. Disponível em: <http://www.sedap.pa.gov.br/sites/default/files/arquivos_dados_agropecuarios/PANORAMA%20AGR%C3%8DCOLA%20DO%20PAR%C3%81%20%20FEIJ%C3%83O%20%202017_0.pdf>. Acesso em: 18 set. 2018.

SHOUSE, P.; DASBERG, S.; JURY, W. A.; STOLZY, L. H. Water deficit effects on water potential, yield, and water use cowpeas. **Agronomy Journal**, Madison, v.73, p.333-336, 1981.

SILVA, C. R. da. et al. Variação sazonal na evapotranspiração de plantas jovens de lima ácida ‘Tahiti’. **Irriga**, Botucatu, v.11, n.1, p.26-35, 2006.

SILVA, C. D. S. et al. Curso diário das trocas gasosas em plantas de feijão-caupi submetidas a deficiência hídrica, **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 4, p. 7-13, 2010.

SILVA, K. J. D. e; ROCHA, M. de M.; MENEZES JÚNIOR, J. A. N. de. Socioeconomia. In: BASTOS, E. A. (Coord.). A cultura do feijão-caupi no Brasil. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2016. p. 6-12. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/310774101_A_cultura_do_feijaocaupi_no_Brasil>. Acesso em: 05 jan. 2018.

SINGH, P. B. Irrigation water management for bush snap bean production. **Horticultural Science**, Alexandria, v.24, p.69-70, 1989.

SINGH, S.P. Selection for water-stress tolerance in interracial populations of common bean. **Crop Science**, Madison, v.35, p.118-124, 1995.

SIQUEIRA, G. M. **Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos**. 2006. 163f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico, Campinas, 2006.

SOUSA, M. A.; LIMA, M. D. B.; SILVA, M. V. V.; ANDRADE, J. W. S. Estresse hídrico e profundidade de incorporação do adubo afetando os componentes de rendimento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.39, p.175-182, 2009.

SOUZA, C. H. E.; MACHADO, V. J.; NETO, I. P.; BENEDETTI, T.C.; LANA, R. M. Q. Extratores para fósforo disponível em Latossolos e eficiência de fontes fosfatadas para milho cultivado em vaso. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.10, n.1, p.38-46, 2011.

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

SOUZA, R. O. R. M.; PANTOJA, A.V.; AMARAL, M. A. C. M.; NETO, J. A. P. Cenário da agricultura irrigada no estado do Pará. **Irriga**, v.17, n.3, p.177-188. 2012.

SOUZA, R. P.; MACHADO, E. C.; SILVA, J. A. B.; LAGOA, A. M. M. A.; SILVEIRA, J. A. G. Photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and some associated metabolic changes in cowpea (*Vigna unguiculata*) during water stress and recovery. **Environmental and Experimental Botany** .51, n.1, p.45-56, 2004.

SOUZA, R.O.R.M.; PANTOJA, A.V.; AMARAL, M. A. C. M.; NETO, J.A.P. Cenário da agricultura irrigada no estado do Pará. **Irriga**, v.17, n.3, p.177-188. 2012.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; RAES, D. **Crop yield response to water**. Rome, 2012. 505p. FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER 66.

STEWART, J. L.; HANKS, R. J.; DANIELSON, R. E.; JACKSON, E. B.; PRUITT, W. O.; FRANKLIN, W. T.; RILEY, J. P.; HAGAN, R. M. **Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil**. Logan: Utah State University, Utah Water Research Laboratory, 1977. 191p. (Report, PRWG151-1).

SUBBARAO, G.V.; JOHANSEN, C.; SLINKARD, A.E.; RAO, R.C.N.; SAXENA, N.P. & CHAUHA, Y.S. Strategies for improving drought resistance in grain legumes. **Critical Reviews in Plant Science**, Pearl River, v. 14, p. 469-529, 1995.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. Redwood City: The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., 1991.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.

TÉOFILO, E. M.; MAMEDE, F. B.; SOMBRA, N. S. Hibridação natural em feijão caupi. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.23, n.4, p.1011-1012, 1999.

THORNTHWAITE, C. W. & MATHER, J. R. The water balance. **Publications in Climatology**. 104 p. New Jersey, Drexel Inst. of Technology, 1955.

THORNTHWAITE, C. W.; WILM, H. G. Report of the Commite on evapotranspiration and transpiration, 1943-1944. Washington, D. C.: **Transactions of the American Geophysical Union**, 1944. p.686-693.

TOMMASELLI, J. T. G. **Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um aparelho de TDR (Time Domain Reflectometry)**. 1997. 109 p. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

TOMMASELLI, J. T. G.; BACCHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 9, p.1145-1154, 2001. *Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.36, n.9, p.1145-1154.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Eletromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, Washington, v. 16, p. 574-582, 1980.

TSEGAYE, T. D.; TEDESSE, W.; COLEMAN, T. L.; JACKSON, T. J. & TEWOLDE, H. Calibration and modification of impedance probe for near surface soil moisture measurements. **Canadian J. Soil Sci.**, 84:237-243, 2004.

TURK, K.J.; HALL, A.E.; ASBELL, C.W. Drought adaptation of cowpea. I. Influence of drought on seed yield. **Agronomy Journal, Madison**, v. 72, p. 413-420, 1980.

VAADIA, Y.; RANEY, F. C.; HAGAN, R. M. Plantwater deficits and physiological process. **Annual review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 12, p.265-292, 1961.

VALADARES, R. N.; MOURA, M. C. C. L.; SILVA, A. F. A.; SILVA, L. S.; VASCONCELOS, M. C. C. A.; SILVA, R. G. Adaptabilidade e estabilidade fenotípica em genótipos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) de porte ereto/semi-ereto nas mesorregiões Leste e Sul maranhense. **Agropecuária Científica no Semi-Árido**, 06: 21-27. 2010.

VAZ, C. M. P.; MATSURA, E. E.; TORRADO, P. V. & BACCHI, O. O. S. **Validação de 3 equipamentos de TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) para a medida da umidade de solos**. São Carlos, Embrapa, 2004. 4p. (Comunicado Técnico, 61).

VIELMO, A. L. **Limite superior da retenção da água no solo: método de campo e método de estimativa**. 2008. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria

VILLWOCK, R.; TAVARES, M. H. F. & VILAS BOAS, M. A. Calibração de um equipamento TDR em condições de campo. **Irriga**, 9:82-88. 2004.

WANG, F.; CHEN, X.; LUO, G.; DING, J.; CHEN, X. Detecting soil salinity with arid fraction integrated index and salinity index in feature space using Landsat TM imagery. **Journal Arid Land**, v.5, p.340 – 353, 2013.

ZAMSKI, E.; SCAFFER, A. A. **Photoasimilate distribution in plants and crops**. New York: Marcel Dekker, 1996.905p.

2 CALIBRAÇÃO E ESTIMATIVA DA UMIDADE EM UM LATOSSOLO AMARELO DISTRÓFICO PELA TIME DOMAIN REFLECTOMETRY NA AMAZÔNIA.

RESUMO

A calibração de sensores com Time Domain Reflectometry (TDR) em solos amazônicos é necessário para minimizar erros na estimativa da umidade volumétrica de água no solo (θ) pela constante dielétrica aparente do solo (K_a) em sistemas de irrigação, porém inexistentes. Assim, objetivou-se determinar e avaliar modelos de calibração de estimativa da θ em um Latossolo Amarelo Distrófico de Castanhal (PA) pela TDR. Valores de θ obtidos pelo método gravimétrico em função da K_a e da θ , estes fornecidos por 4 sensores CS616 da Campbell Scientific foram correlacionados e ajustados. Seis modelos de calibração foram determinados, sendo 2 lineares e 4 polinomiais cúbicos. Os modelos de calibração apresentaram ótimo desempenho e alta exatidão de acordo com os critérios estatísticos avaliados. Houve diferença significativa entre a θ estimada pelos sensores, o gravimétrico e os seis modelos, onde as equações linear e quadrática da Campbell Scientific subestimaram os valores da K_a em valores de θ pelo método gravimétrico, embora não tenha havido diferença significativa pelo teste de Kruskal-Wallis entre os modelos obtidos na calibração e a equação linear da fabricante. Observou-se diferença significativa entre os modelos de calibração deste trabalho e os de Topp, Ledieu, Roth, Malicki e Tommaselli e Bacchi que superestimaram os valores de θ .

Palavras-chave: gravimetria, água no solo, agricultura de precisão, constante dielétrica aparente.

2.1 INTRODUÇÃO

A Time Domain Reflectometry (TDR) é uma técnica digital que realiza o monitoramento da água no solo, medindo-se a variação no armazenamento da água em um determinado volume de solo ininterruptamente em tempo real, permitindo o uso racional da água pela agricultura que é a atividade responsável pela retirada da maior quantidade dos corpos hídricos do País, além de auxiliar os produtores rurais no planejamento, dimensionamento e gerenciamento dos sistemas de irrigação na oferta da quantidade adequada de água para a planta com economia de energia elétrica (Murga-Orrillo et al., 2016; ANA, 2017).

O princípio da técnica baseia-se na propriedade física dos materiais denominada de constante dielétrica aparente do solo (K_a), cujo valor da água (80) superior ao da matriz seca

34 do solo (3) e do ar (1) permite maior permissividade de polarização entre a molécula de água e
35 o elétron e representa a relação entre a capacitância de um meio isolador e o espaço livre,
36 medindo-se o tempo de trânsito do pulso eletromagnético através de guias de ondas
37 eletromagnéticas (Souza et al., 2016).

38 Os sensores com TDR têm sido adotados na agricultura de precisão e nas estações
39 meteorológicas automáticas com a finalidade agrometeorológica, a fim de, estimar o conteúdo
40 de água no solo a partir da K_a através de modelos empíricos e semi-empíricos, sendo um método
41 indireto, não destrutivo, automático, exato e pouco dependente dos fatores ambientais
42 (Gonçalves et al., 2011). Além disso, os dados obtidos por estes equipamentos não necessitam
43 de análise em laboratório, auxiliando no manejo eficiente da água na estimativa da
44 evapotranspiração em agroecossistemas (Farias et al., 2017) e na observação da sua variação
45 espacial e temporal no sistema solo-planta-atmosfera (Santana et al., 2012).

46 Entretanto, modelos empíricos de estimativa da umidade volumétrica de água no solo
47 (θ) usados para ajuste dos valores obtidos através da TDR, como os de Topp et al. (1980)
48 considerados universais ou curvas genéricas que dispensam calibração local do sensor, são
49 veementemente refutados na pesquisa do monitoramento da água no solo estimada pela técnica,
50 pois baseiam-se apenas nas relações funcionais e de dependência entre a K_a e θ , assim como os
51 modelos de Ledieu et al. (1986), Tommaselli e Bacchi (2001) e os recomendados pela fabricante
52 Campbell Scientific.

53 Ao desconsiderarem as variáveis que caracterizam a física e química do solo, esses
54 modelos podem alterar os valores da θ , pois o tipo de solo mineral ou orgânico, textura,
55 principalmente em Latossolos que possuem altos teores de óxido de ferro são fontes de erro
56 para estimativa do conteúdo de água no solo com TDR (Guimarães et al., 2019). Modelos
57 físicos ou semi-empíricos como os de Roth et al. (1990) e Malicki et al. (1996) consideram a
58 densidade aparente e porosidade do solo, respectivamente, o que conferi robustez na

59 parametrização do modelo, porém também podem promover erros na estimativa da θ
60 (Gonçalves et al., 2011).

61 Deste modo, a utilização de modelos empíricos ou físicos não calibrados podem levar a
62 sub ou superestimativa da θ (Silva & Gervásio, 1999; Santos et al., 2010). Com o intuito de
63 minimizar estas variações, faz-se a calibração local de modelos específicos para cada tipo de
64 solo, que é uma das principais dificuldades encontradas pelos pesquisadores, devido à ausência
65 também de um método padrão de calibração, além do custo de aquisição dos sensores (Almeida
66 et al., 2012; Lima et al., 2018).

67 Nos solos amazônicos modelos de calibração são necessários, principalmente em
68 regiões com grandes áreas de irrigação como o Nordeste paraense (Souza et al., 2012) que
69 auxiliam na correção dos dados de umidade do solo obtidos pela TDR e a realização do balanço
70 hídrico em cultivos agrícolas que adotam a tecnologia, porém são ausentes na literatura, não
71 conhecendo-se o comportamento da TDR nessas condições edafoclimáticas.

72 Portanto, objetivou-se determinar e avaliar modelos de calibração de estimativa da
73 umidade volumétrica de água em um Latossolo Amarelo Distrófico do Nordeste paraense pela
74 Time Domain Reflectometry.

75

76 **2.2 MATERIAL E MÉTODOS**

77 **2.2.1 Área experimental e características do solo**

78 A pesquisa ocorreu no período de 07/08/2017 a 24/05/2018 compreendendo a coleta e
79 análise do solo, testes iniciais e de medição da θ . O solo utilizado foi coletado na Fazenda
80 Escola da UFRA no município de Castanhal, Pará (1°19'24.48" S, 47°57'38.20" W, 41 m) e foi
81 classificado como Latossolo Amarelo Distrófico (Santos et al., 2013). O município apresenta
82 clima do tipo "Am" de acordo com a classificação de Koppen, com temperatura média anual de

83 26 °C, umidade relativa máxima e mínima de 95 % e 79 %, respectivamente, com precipitação
84 média anual de 2.571,6 mm (Souza et al., 2017).

85 As amostras indeformadas foram coletadas em quatro cilindros que possuíam 0,30 m de
86 altura e 0,10 m de diâmetro, inseridos no solo até o preenchimento de sua superfície sendo
87 retirados de forma a não compactar o solo (Figura I).

88

89

90

91

92

93



94 FIGURA I. Coleta das quatro amostras indeformadas do latossolo amarelo distrófico em
95 Castanhal, Pará (A) para a calibração dos sensores e sua disposição no laboratório (B).

96

97 Foram coletadas amostras indeformadas com anéis volumétricos de 10 cm com quatro
98 repetições para cada profundidade para determinação da densidade do solo, capacidade de
99 campo e ponto de murcha permanente na câmara de pressão de Richards, e amostras
100 deformadas com trado holândes para análise física e química do solo, ambas realizadas no
101 laboratório da EMBRAPA Amazônia Oriental que classificou texturalmente o solo como
102 franco-arenosa (Tabela I).

103

104

105

106

107 TABELA I. Propriedades físicas e químicas do Latossolo Amarelo Distrófico utilizado na
 108 calibração dos sensores CS616, 2018.

Prof. (m)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	θ_{cc} ($m^3 m^{-3}$)	θ_{pmp} ($m^3 m^{-3}$)	Ds ($g cm^{-3}$)	η ($m^3 m^{-3}$)	MO ($g kg^{-1}$)	Fe ($g kg^{-1}$)
0-0,2	72,8	13,2	14	0,21	0,12	1,56	0,53	15,72	0,4
0,2-0,4	68,6	13,4	18	0,24	0,14	1,71	0,52	7,29	0,3

109 Fonte: Laboratório de Solos da Embrapa Amazônia Oriental. Granulometria - (método da pipeta); θ_{cc} - capacidade de campo
 110 e θ_{pmp} - ponto de murcha (extrator de Richards); Ds - densidade do solo (anel volumétrico); η - porosidade total; MO - matéria
 111 orgânica (dicromato); Fe: - ferro (extração com solução Mehlich⁻¹).
 112

113 2.2.2 Calibração pelo método gravimétrico

114 Os testes foram realizados no Laboratório de Agrometeorologia da Universidade
 115 Federal Rural da Amazônia (UFRA), em Belém, Pará. Inicialmente, as massas dos cilindros
 116 contendo o solo foram determinadas por uma balança eletrônica com 0,001 g de precisão. Após
 117 a coleta em campo, as amostras tiveram a face inferior envolvida por um tecido preso por uma
 118 liga elástica, evitando perda de solo. No laboratório, os solos contidos nos cilindros foram
 119 saturados durante 48 h e, em seguida, dispostos sobre um estrado até que não houvesse
 120 drenagem (Figura IB).

121 Estas amostras de solo foram utilizadas na avaliação de quatro reflectômetros do
 122 conteúdo de água CS616 (Campbell Scientific Inc., Utah, USA-CSI). Estes, compostos de um
 123 dispositivo elétrico ligado por cabos a duas hastes de aço inoxidável com 0,30 m de
 124 comprimento, 0,0032 m de diâmetro com espaçamento de 0,032 m.

125 Os sensores foram conectados a um data logger CR1000 (Campbell Scientific. Inc.,
 126 Logan, Utah, USA-CSI) que recebeu energia de uma bateria de 12 V alimentada por uma placa

127 solar de 25 V (Figura II). A programação inserida no data logger realizou leituras da K_a e θ das
 128 amostras a cada 10 segundos e armazenou as médias a cada 10 minutos.

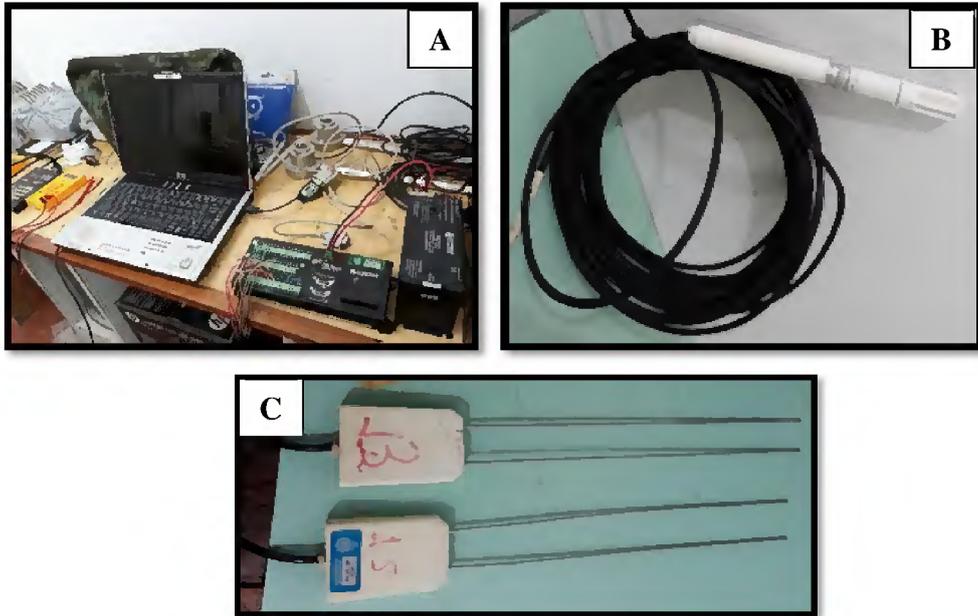
129

130

131

132

133



134

135

136

137

138 FIGURA II. Computador, data logger, bateria (A), sensor de temperatura e umidade do ar (B),
 139 sensores CS616 (C) utilizados na medição da umidade volumétrica de água no latossolo
 140 amarelo distrófico.

141

142 A frequência de pulsação das hastes é de aproximadamente 70 MHz, sendo reduzida
 143 nos estágios de saída do circuito dos sensores para a frequência medida pelo data logger. A
 144 frequência de saída está empiricamente relacionada ao teor de água que através das equações
 145 Linear (Equação 1) e Quadrática (Equação 2) do sensor com precisão de 0,1% recomendadas
 146 pela fabricante que estimam a θ a partir da K_a que é medida pelo CS616.

147

$$148 \quad \theta = -0,4677 + 0,0283 * K_a \quad (1)$$

$$149 \quad \theta = -0,0663 - 0,0063 * K_a + 0,0007 * K_a^2 \quad (2)$$

150

151 Cada sensor CS616 foi inserido no sentido vertical no cilindro com amostra de solo. A
 152 massa de cada cilindro foi obtida com e sem os sensores que permaneceram em contato com as
 153 amostras de solo até o final do experimento, sendo tomadas diariamente a umidade pelo método
 154 gravimétrico na temperatura média do ar de 27 °C e umidade relativa média de 78% em cada
 155 cilindro, estes foram mantidos com a superfície do solo exposta para que houvesse perda de
 156 água por evaporação.

157 Após a última pesagem e leitura da K_a e θ pela não variação da massa das amostras, foi
 158 determinada a massa do solo seca pelo método-padrão da estufa (24 horas a 105 °C). A partir
 159 das massas de solo seco, úmido e da densidade do solo foram obtidos os valores de umidade
 160 volumétrica pelo método gravimétrico (θ_g) de acordo com a equação 3.

161

$$162 \quad \theta_g = \frac{(PU)-(PS)}{(PS)} * \frac{D_s}{D_a} \quad (3)$$

163

164 onde:

165 θ_g - umidade volumétrica de água no solo, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

166 PU - massa do solo úmido - PR, g;

167 PS - massa do solo seco - PR, g;

168 PR - massa do cilindro, sensores e envoltórios (elástico + tecido), g;

169 D_s - densidade do solo, g cm^{-3} ;

170 D_a - densidade da água, g cm^{-3} .

171

172 A partir dos valores medidos de θ_g foi realizada análise de regressão utilizando modelos
 173 lineares, quadráticos, cúbicos e exponenciais para as quatro repetições individualmente e para
 174 todos os pontos coletados nas quatro amostras pela relação entre a θ_g e a K_a e entre a θ_g e a θ

175 estimada pelas equações Linear (Equação 1) e Quadrática (Equação 2) recomendadas pela
 176 Campbell Scientific Inc. (CSI), sendo a θ_g a variável independente (y), K_a e θ a variável
 177 dependente (x), obtendo-se no final, três modelos de calibração individual na amostra que
 178 apresentou melhor desempenho e três modelos a partir de todos os pontos coletados nas quatro
 179 amostras de solo.

180 2.2.3 Avaliação dos modelos

181 As avaliações das estimativas da θ dos modelos foi realizada comparando-os com a θ_g ,
 182 utilizando os seguintes parâmetros estatísticos de precisão: coeficiente de correlação (r)
 183 (Equação 4) e exatidão: coeficiente de confiança (c) (Equação 5), índice de concordância de
 184 Willmott (d) (WILLMOTT et al., 1985) (Equação 6), eficiência do modelo (EF) (Equação 7) e
 185 raiz do erro quadrático médio (RMSE) (Equação 8) que eliminam problemas de compensação
 186 entre sub e superestimativas pela alta sensibilidade aos grandes erros produzidos pelos modelos
 187 e por elevarem as diferenças individuais ao quadrado, ambos expressos de 0 a 100% (WILKS,
 188 2006).

189

$$190 \quad r = \frac{\sum (O - \hat{O})(P - \hat{P})}{\sqrt{(\sum (O - \hat{O})^2)(\sum (P - \hat{P})^2)}} \quad (4)$$

191

$$192 \quad c = r \cdot d \quad (5)$$

193

$$194 \quad d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P - O)^2}{\sum_{i=1}^N [(|P - \hat{O}|) + (|O - \hat{O}|)]^2} \quad (6)$$

195

$$196 \quad EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P - \hat{P})^2}{\sum_{i=1}^N (P - \hat{O})^2} \quad (7)$$

197

$$198 \quad \text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P-O)^2}{N}} * \frac{100}{\bar{O}} \quad (8)$$

199

200 onde:

201 O - valores de umidade volumétrica pelo método gravimétrico, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;202 \bar{O} - média dos valores de umidade volumétrica pelo método gravimétrico, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;203 P - valores estimados, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;204 \bar{P} - média dos valores estimados, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

205 N - número de leituras.

206

207 O desempenho dos modelos foi avaliado pelo coeficiente de confiança (c) (CAMARGO
208 e SENTELHAS, 1997). A classificação da exatidão dos modelos foi realizada conforme o
209 percentual do RMSE (JAMIESON et al. 1991) e os demais pela magnitude expressa.

210 Os modelos que apresentaram os melhores desempenhos nas estimativas da θ obtidos
211 pela relação entre a θ_g em função da K_a na calibração para o solo em estudo, foram comparados
212 com a θ estimada por modelos de calibração referência na literatura obtidos com TDR em várias
213 classes de solo de Topp et al. (1980) (9), Ledieu et al. (1986) (10), Roth et al. (1990) (11),
214 Malicki et al. (1996) (12) e Tommaselli e Bacchi (2001) (13).z

215

$$216 \quad \theta = -5,3 * 10^2 + 2,92 * 10^2 * K_a + 5,5 * 10^{-4} * K_a^2 + 4,3 * 10^6 * K_a^3 \quad (9)$$

217

$$218 \quad \theta = 0,1138 * \sqrt{K_a} - 0,1756 \quad (10)$$

219

$$220 \quad \theta = \frac{\sqrt{K_a} - (2 - \eta)}{8} \quad (11)$$

221

$$\theta = (\sqrt{K_a} - 0,819 - 0,168 * D_s - 0,159 * D_s^2) / (7,17 + 1,18 * D_s) \quad (12)$$

223

$$\theta = 1,1^{-5} * K_a^3 - 0,0007 * K_a^2 + 0,0257 * K_a - 0,0202 \quad (13)$$

225

226 onde:

227 η - corresponde à porosidade do solo, $m^3 m^{-3}$;228 K_a - constante dielétrica aparente do solo, adimensional.

229

230 Avaliou-se a θ estimada pelos modelos que obtiveram os melhores desempenhos na
 231 calibração em cada amostra e com todos os pontos medidos nas quatro repetições, a θ estimada
 232 pelo sensor CS616 com as equações Linear e Quadrática, a θ estimada pelos modelos de
 233 calibração da literatura com a θ_g através do teste de Kruskal-Wallis para comparação dos
 234 valores entre os grupos em amostras independentes, a um nível de significância de 5% de
 235 probabilidade, através do software R (R, 2018).

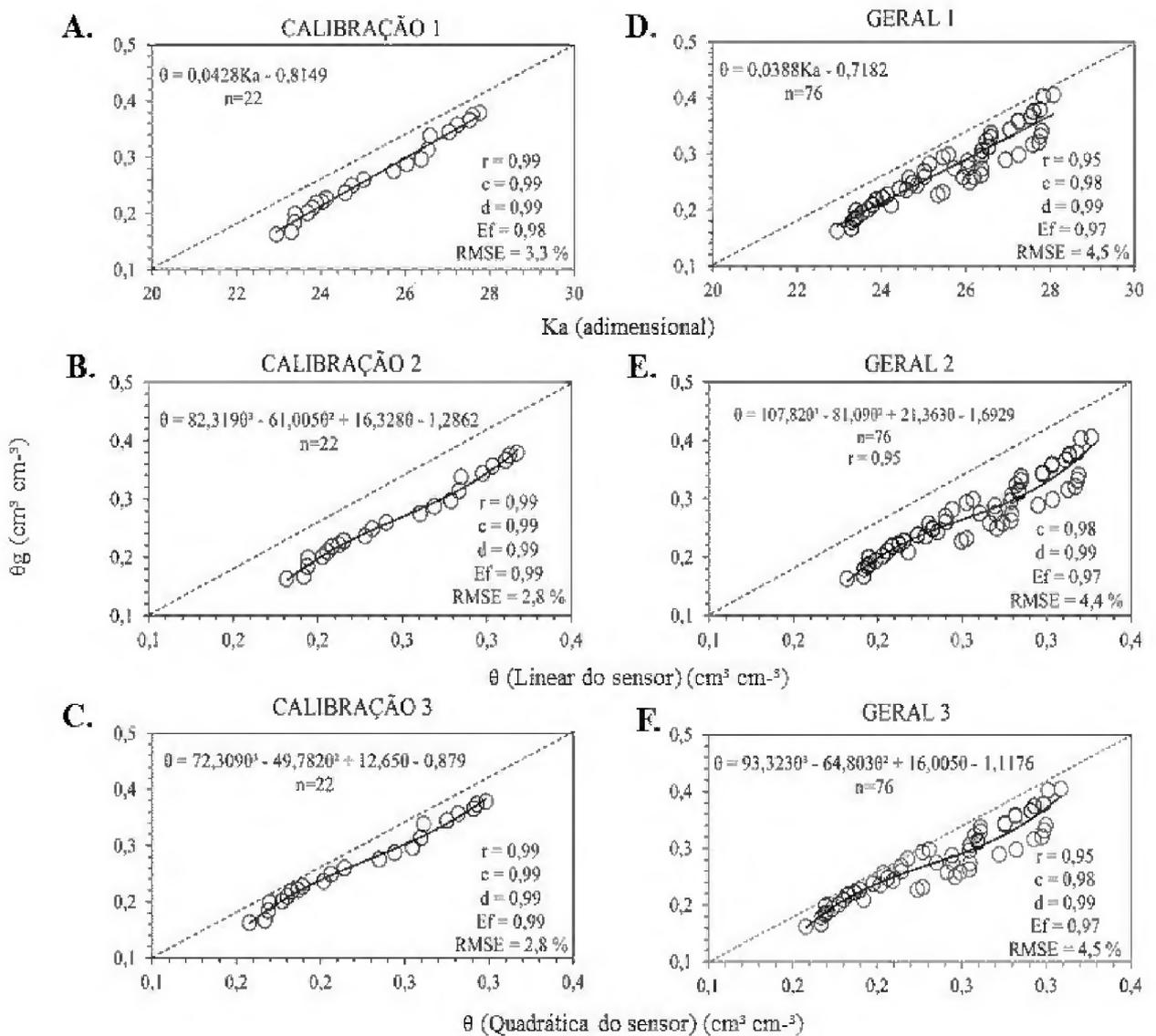
236

237 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

238 Na figura III observa-se os seis modelos que apresentaram os melhores parâmetros
 239 estatísticos na calibração por meio dos ajustes realizados a partir dos valores de θ_g medidos no
 240 intervalo de 0,16 a 0,38 $cm^3 cm^{-3}$ correlacionados com a K_a e as equações recomendadas pela
 241 fabricante.

242 Pela relação entre a θ_g e a K_a foram obtidas duas equações com ajuste linear (Figura
 243 IIIA e IIID), a equação denominada de Calibração 1 ($\theta = 0,0428K_a - 0,8149$) estabelecida com
 244 as medidas de uma das quatro repetições das amostras de solo e a equação Geral 1 ($\theta =$
 245 $0,0388K_a - 0,7182$) obtida com todas as medidas nas quatro repetições, sendo estas as equações
 246 ajustadas que apresentaram o melhor desempenho na estimativa da θ .

247 Já pela relação entre a θ_g e a θ estimada pelas duas equações da fabricante foram obtidos
 248 quatro modelos com ajuste polinomial cúbico. Dois modelos com a equação Linear do sensor
 249 ($\theta = 82,319\theta^3 - 61,005\theta^2 + 16,328\theta - 1,2862$) e ($\theta = 107,82\theta^3 - 81,09\theta^2 + 21,363\theta - 1,6929$),
 250 denominadas de Calibração 2 e Geral 2 (Figura IIIB e IIID), e dois modelos com a equação
 251 Quadrática do sensor ($\theta = 72,309\theta^3 - 49,782\theta^2 + 12,65\theta - 0,879$) e ($\theta = 93,323\theta^3 - 64,803\theta^2 +$
 252 $16,005\theta - 1,1176$) chamadas de Calibração 3 e Geral 3, respectivamente (Figura IIIC e IIIF).
 253



254

255 FIGURA III. Calibrações entre a θ_g em função da Ka (IIIA, IIID), θ_g e equação linear do sensor
 256 (IIIB, IIIE), θ_g e equação quadrática do sensor (IIIC, IIIF). Avaliação dos modelos pelo

257 coeficiente de correlação (r), índice de confiança (c), índice de concordância (d), eficiência do
258 modelo (Ef) e raiz do erro quadrático médio (RMSE). As equações da figura IIIA, IIIB e IIIC
259 foram as que apresentaram os melhores parâmetros na calibração em cada amostra. As figuras
260 IIID, IIIE, IIIF foram as equações obtidas com todos os pontos das quatro amostras durante o
261 experimento com o Latossolo Amarelo Distrófico, Castanhal, PA.

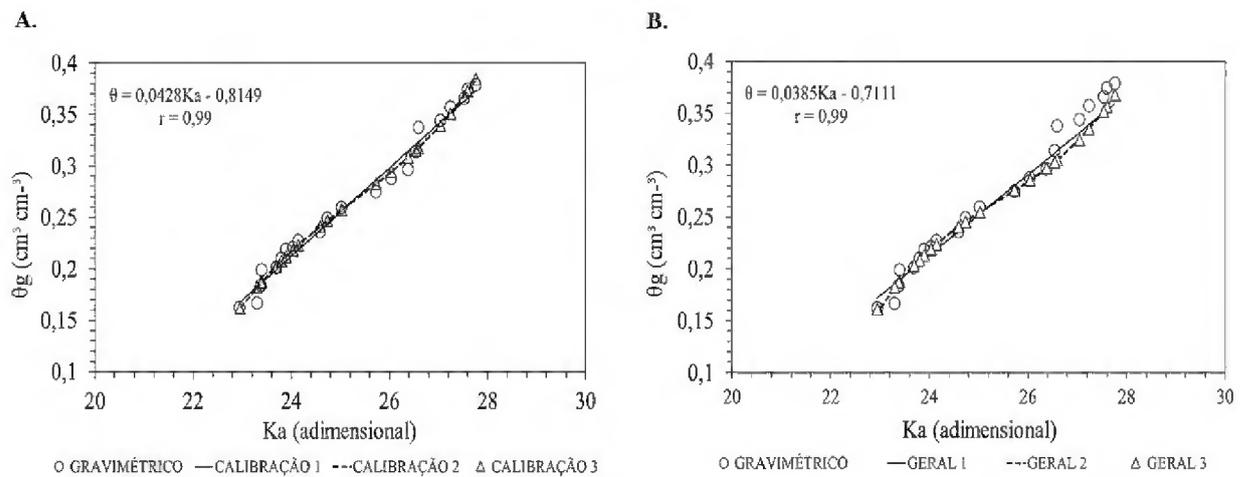
262

263 Os modelos individuais de Calibração 1, 2 e 3 (Figura IIIA, IIIB e IIIC) apresentaram
264 os melhores valores simulados na avaliação dos parâmetros estatísticos para estimar a θ quando
265 comparados com o menor desempenho dos três modelos gerais (Figura IIID, IIIE e IIIF), o que
266 deve interferir na precisão e exatidão das estimativas do teor de água no solo por essas equações.

267 Os seis modelos de calibração avaliados na estimativa da θ obtiveram ótimos
268 desempenhos decorrentes dos elevados valores de correlação, índice de confiança, índice de
269 concordância de Willmott, eficiência do modelo, além de apresentar baixos erros com os
270 valores de RMSE menores que 5%, simulando com excelente exatidão os valores obtidos por
271 gravimetria e corrigindo os valores estimados pelo sensor CS616 conforme apresentado na
272 figura IV.

273 A partir de $0,35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ os modelos gerais (Figura IVB) apresentaram uma pequena
274 subestimava para θ e os individuais (Figura IVA) mantiveram padrão semelhante ao
275 gravimétrico, sendo todos os modelos ajustados desse trabalho coincidentes e próximos entre
276 si, ratificando a calibração necessária para cada solo especificamente.

277



278

279 FIGURA IV. Comportamento do conteúdo de água no solo estimada pelos três melhores
 280 modelos de calibração obtidos com amostras individuais (A) e com todos os pontos das quatro
 281 amostras de solo (B) do experimento de calibração dos sensores CS616, 2018.

282 O ótimo ajuste polinomial cúbico nos modelos de calibração e geral 2 e 3 (Figura IIIB,
 283 IIIC, IIID e IIIE) decorreu da flexibilidade dos parâmetros do modelo, realizado a partir dos
 284 dados observados, corroborando com o obtido por Topp et al. (1980) quando calibraram e
 285 validaram sensores com TDR em diferentes classes de solos no Canadá e afirmaram que este
 286 ajuste foi preciso para estimar a θ . Coelho et al. (2006) também concluíram que o modelo
 287 polinomial cúbico foi ideal para a calibração com exatidão no Latossolo Amarelo, Latossolo
 288 Vermelho e Neossolo Fúlvico em Minas Gerais, corroborando com o excelente ajuste obtido
 289 no Latossolo Amarelo Distrófico de Castanhal.

290 Entretanto, o ajuste linear mostrou-se ser melhor que o polinomial cúbico na correlação
 291 entre a umidade gravimétrica e Ka (Figura IIIA, IIID). No trabalho de Santos et al. (2010) o
 292 ajuste linear apresentou o melhor desempenho para o Latossolo Vermelho pela correlação entre
 293 a Ka e a θ , assim como para Guimarães et al. (2019) em um Latossolo Vermelho Distroférico
 294 em diferentes sistemas de manejo do solo em três profundidades distintas no perfil do solo em
 295 Jataí, Goiás.

296 Não verificou-se diferença significativa ($P>0,05$) entre a θ_g , os modelos de calibração
 297 1, 2 e 3, os modelos gerais e a equação Linear do sensor pelo teste de Kruskal-Wallis (Tabela
 298 II). Caso a calibração local não seja realizada, recomenda-se aos produtores rurais que utilizam
 299 sensores com a TDR a equação Linear (Equação 1) da fabricante, tendo em vista a não diferença
 300 significativa observada em relação a θ_g para o solo estudado.

301

302 TABELA II. Estatística descritiva dos valores médio, desvio padrão, máximo, mínimo e o
 303 agrupamento da umidade volumétrica de água no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) pelo teste de Kruskal-Wallis
 304 estimado por todos os modelos.

Modelo	Média/DP	Máximo	Mínimo
Roth et al. (1990)	0,44±0,02 a*	0,47	0,41
Topp et al. (1980)	0,40±0,02 b	0,43	0,38
Ledieu et al. (1986)	0,40±0,02 b	0,42	0,37
Malicki et al. (1996)	0,39±0,02 b	0,42	0,37
Tommaselli e Bacchi (2001)	0,36±0,02 c	0,39	0,33
Calibração 1	0,27±0,07 d	0,37	0,17
Calibração 2	0,27±0,07 d	0,38	0,16
Calibração 3	0,27±0,07 d	0,38	0,16
Geral 1	0,26±0,06 d	0,36	0,17
Geral 2	0,26±0,06 d	0,37	0,16
Geral 3	0,26±0,06 d	0,37	0,16
Gravimétrico	0,27±0,07 d	0,38	0,16
Linear do Sensor	0,25±0,05 de	0,32	0,18
Quadrática do Sensor	0,22±0,05 e	0,30	0,16

305 *Médias do grupo seguidas por letras distintas, na coluna, diferem pelo Teste de Kruskal-Wallis ($P<0,05$).

306

307 Porém, constatou-se que a equação Quadrática do sensor apresentou diferença
 308 significativa com o gravimétrico e as equações de calibração, isso devido ela ser um polinomial
 309 quadrático que pode estimar a θ em uma condição de maior dispersão dos dados, simulando

310 com menor precisão e exatidão valores do conteúdo de água pela TDR (Tabela III). Observou-
 311 se após todos os ajustes para a obtenção do melhor modelo de estimativa da θ que o ajuste
 312 polinomial quadrático obteve desempenho superior ao exponencial realizado a partir da
 313 regressão, porém ambos foram inferiores aos ajustes linear e polinomial cúbico.

314

315 TABELA III. Avaliação dos modelos de estimativa da umidade volumétrica de água com TDR
 316 citados na literatura e recomendado pela fabricante CSI com uso de amostras de solo com
 317 estrutura deformada e indeformada, a partir do coeficiente de correlação (r), índice de confiança
 318 (c), índice de concordância (d) e raiz do erro quadrático médio (RMSE).

Modelo	r	C	d	RMSE (%)	Classificação
Linear do Sensor	0,99	0,92	0,92	11,84	Ótimo
Quadrática do Sensor	0,99	0,83	0,84	18,61	Muito Bom
Tommaselli e Bacchi (2001)	0,99	0,55	0,55	39,89	Mediano
Malicki et al. (1996)	0,99	0,48	0,49	51,78	Sofrível
Ledieu et al. (1986)	0,99	0,48	0,49	52,24	Sofrível
Topp et al. (1980)	0,99	0,46	0,47	54,83	Sofrível
Roth et al. (1990)	0,99	0,41	0,42	69,18	Mau

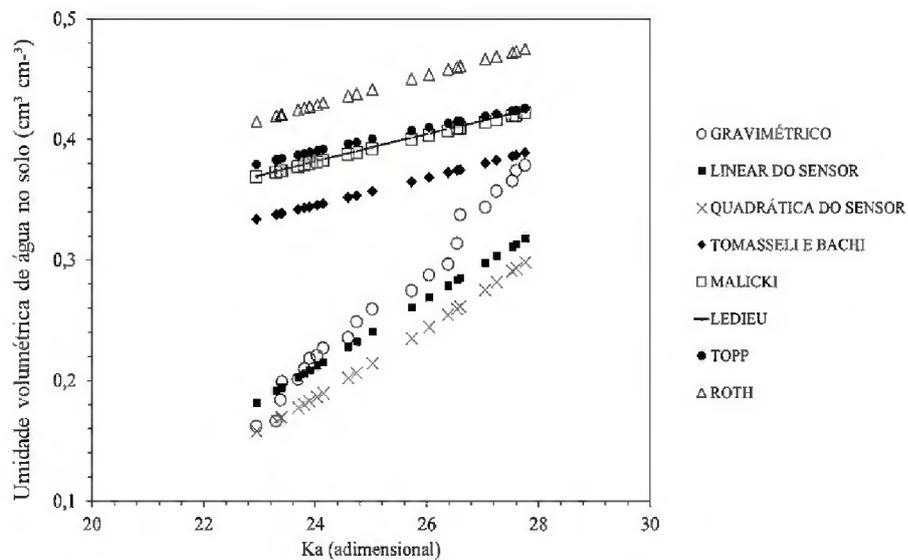
319

320 A estimativa da θ pelas equações da CSI apresentou subestimativa dos valores da K_a
 321 em valores de θ para o Latossolo Amarelo Distrófico em 72,7 % para a equação Linear e 90,9
 322 % para a Quadrática, onde os valores máximos e médias são menores quando comparados com
 323 os obtidos pelo método gravimétrico e as estimativas obtidas com os modelos de calibração
 324 (Figura V).

325 Tal resultado pode ter ocorrido devido a granulometria do solo que conferi
 326 predominância da macroporosidade na sua estrutura, maior permeabilidade pela menor área
 327 superficial específica das partículas de areia e a elevada capacidade de adsorção da água

328 higroscópica pelas partículas de silte e argila, fazendo com que o elétron do sensor não realize
 329 a polarização com a água e a medição da K_a , e conseqüentemente a estimativa da θ , seja abaixo
 330 da água disponível no solo, ocorrendo essa subestimativa também ainda, pela presença da
 331 matéria orgânica e o elevado teor de óxido de ferro presente nesse tipo de solo que interagem
 332 adsorvendo a água no solo (Guimarães et al., 2019).

333



334

335 FIGURA V. Comportamento da umidade volumétrica de água no solo (θ) entre 0,16 a 0,38 cm³
 336 cm⁻³ dos modelos de calibração da literatura e da CSI pela relação entre a θ em função da
 337 constante dielétrica aparente do solo (K_a) para Latossolo Amarelo Distrófico.

338

339 Lima et al. (2018) concluíram que as equações Linear e Quadrática desenvolvidas pela
 340 CSI do CS616 subestimaram a θ no Argissolo Amarelo e Cambissolo Háplico na Bahia, assim
 341 como Francesca et al. (2010) calibrando diretamente no campo o CS616 para a profundidade
 342 de 0-0,2 m na Itália. Pesquisando sobre os efeitos da densidade do solo na estimativa da θ com
 343 uso do sensor CS616 em um Latossolo Vermelho Amarelo, Almeida et al. (2012) verificaram
 344 que o solo com densidade menor, apresentou menor valor de θ para o mesmo valor da K_a ,

345 quando comparado com um solo de maior densidade aparente, o que justifica o comportamento
346 observado de subestimativa no Latossolo Amarelo Distrófico de Castanhal que possui menor
347 densidade aparente com textura franco-arenosa.

348 Para o Latossolo estudado, observou-se que os valores de θ_g dos seis modelos obtidos
349 na calibração e os estimados pelas equações Linear e Quadrática do sensor apresentaram menor
350 dispersão nos valores de umidade inferiores a $0,22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,19 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente,
351 com melhor concordância no comportamento das curvas (Figura V).

352 A maior correlação com menores conteúdos de água no solo, provocando menores
353 variações entre os valores estimados em solos minerais pela TDR, também foi observado por
354 Serrarens et al. (2000) e Tommaselli e Bacchi (2001), sendo nessa faixa de umidade o encontro
355 de parte significativa dos valores de capacidade de campo e do ponto de murcha permanente
356 dos solos utilizados na agricultura irrigada, o que diminui o erro e permite melhor
357 gerenciamento sobre o monitoramento correto da água no solo nos agroecossistemas.

358 Para valores de umidade acima de $0,23$ e $0,20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ estimados pela Linear e
359 Quadrática do sensor, respectivamente, mostraram haver aumento de subestimativas da θ , fato
360 também observado por aqueles autores e Roth et al. (1990) que dizem ter elevados valores de θ
361 poder de alterar substancialmente as estimativas com a TDR, tornando as equações da CSI
362 inadequadas para essa situação.

363 Mesmo que a equação Linear do sensor não tenha apresentado diferença significativa
364 com o método gravimétrico, por também ter sido desenvolvida em solos com teor de argila
365 abaixo de 300 g kg^{-1} , os seus parâmetros de avaliação apresentaram menores índices quando
366 comparado com os modelos obtidos na calibração (Tabela III), além de promover
367 superestimativas em valores de umidade abaixo de $0,20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (figura V).

368 Verificou-se ainda que os modelos de calibração da literatura de Tommaselli e Bacchi
369 (2001), Malicki et al. (1996), Ledieu et al. (1986), Topp et al. (1980) e Roth et al. (1990)

370 diferiram estatisticamente ($P < 0,05$) dos demais modelos (Tabela II) e superestimaram a θ
371 (Figura V), situação observada por Santos et al. (2010) para os modelos de Ledieu et al. (1986)
372 e Toop et al. (1980) em um Latossolo Vermelho.

373 Esses resultados explicam o baixo desempenho desses modelos indicado pelos
374 parâmetros estatísticos avaliados (Tabela III), isso devendo-se possivelmente as diferentes
375 classes de solos na maioria de textura argilosa a muito argilosa usados para a obtenção dos
376 modelos de calibração e pela localização geográfica, uma vez que, Topp et al. (1980) e Ledieu
377 et al. (1986) calibraram modelos empíricos para solos do Canadá e Holanda, respectivamente.

378 Observou-se uma menor dispersão entre a estimativa dos métodos de Tommaselli e
379 Bacchi (2001) com o gravimétrico para os valores maiores que $0,36 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, que embora seja
380 um modelo empírico foi o que mais se aproximou do observado neste trabalho com desempenho
381 mediano, devido a sua calibração ser realizada em um Latossolo Vermelho-Amarelo em São
382 Paulo, porém com diferença significativa entre todos os modelos testados (Tabela II).

383 O modelo de Malicki et al. (1996) que é físico ou semi-empírico elaborado com solos
384 da Europa e América do Sul e os modelos empíricos de Ledieu et al. (1986) e Topp et al. (1980)
385 apresentaram resposta similar. Mesmo considerando a inserção de parâmetros físicos do solo,
386 como a porosidade, no modelo de Roth et al. (1990) e a densidade do solo no modelo de Malicki
387 et al. (1996), o que segundo os autores dão robustez ao modelo, ambos apresentaram
388 comportamentos distintos e superestimaram a θ , apresentando desempenho mau e sofrível,
389 respectivamente, para todos os critérios estatísticos de avaliação quando comparados com os
390 demais modelos (Figura V).

391 No trabalho de Coelho et al. (2001), o modelo de Roth et al. (1990) apresentou os
392 maiores valores estimados, a maior média dos desvios e os menores parâmetros de avaliação,
393 assim como neste trabalho, obtendo a pior avaliação. Segundo Gonçalves et al. (2011), a
394 variabilidade da densidade quando incluída nos modelos de calibração podem introduzir erros

395 de grande magnitude para estimar a umidade do solo pela TDR, assim como os modelos
396 empíricos que não consideram os atributos físicos do solo.

397 As variações entre os valores máximos, mínimos e médios estimados por todos os
398 modelos, e principalmente pela subestimativa das equações da CSI, pode levar ao manejo
399 inadequado de irrigação com aumento na lâmina de água aplicada em área de cultivos agrícolas
400 com Latossolo Amarelo Distrófico que monitoram a variação da umidade do solo com a técnica
401 da TDR, sendo indispensável a calibração do sensor para que não haja uma aplicação excessiva
402 de água que reduz a oxigenação nas raízes, absorção de nutrientes e aumenta a lixiviação dos
403 sais no solo (Bassegio et al., 2012; Dutra et al., 2012; Wang et al., 2013).

404 De acordo com Carvalho et al. (2015) os modelos recomendados pela CSI, para alguns
405 tipos de solos não são adequados para a estimativa com exatidão do conteúdo de água no solo
406 em vários estudos no território brasileiro. O comportamento distinto demonstrado pelos modelos
407 elucida que a K_a , diferente do defendido por Topp et al. (1980) não é dependente e sensível
408 apenas ao teor de água no solo, mas ao tipo, densidade, temperatura do solo e do teor de sal
409 solúvel. A CSI recomenda a calibração do sensor tendo em vista essa variação e as
410 especificidades de cada solo, não sendo universal a aplicação de um único modelo para vários
411 tipos de solos.

412 Para trabalhos futuros de calibração de sensores com TDR, observamos que o cano de
413 PVC para a coleta de amostra indeformada é danificado com facilidade durante a penetração
414 no solo na profundidade de 0,3 m, e a inserção e retirada das hastes do sensor nas amostras para
415 levar a estufa danificam a estrutura das amostras.

416 Percebeu-se nos testes iniciais que a calibração com amostras deformadas permite maior
417 entrada de ar, além do que, amostras deformadas e o cano de PVC geram erros de leitura da K_a
418 pela TDR que é sensível a granulometria e a densidade do solo, onde mudanças na densidade

419 do material provoca reflexões indesejadas com sub ou superestimativas da K_a , e
420 conseqüentemente da θ com maior dispersão dos dados influenciando na calibração.

421 Recomenda-se o uso de amostra indeformada para calibração de sensores CS616, pois
422 esse tipo de amostra representa com maior proximidade a realidade da condição edafoclimática
423 do campo, observações corroboradas por Lima et al. (2018) trabalhando com amostras
424 deformadas e indeformadas na Bahia.

425 A TDR é um método alternativo em potencial ao padrão para ser usado pelos produtores
426 no monitoramento da variação da água no solo, mas com prévia calibração, que permite o
427 adequado funcionamento do sensor e auxilia no uso sustentável dos recursos hídricos na
428 agricultura de precisão realizada na Amazônia brasileira.

429

430 **2.4 CONCLUSÃO**

431 Os modelos de calibração linear e polinomial cúbico apresentaram ótimo desempenho
432 podendo ser utilizados na correção e estimativa da umidade volumétrica de água obtido com a
433 TDR em Latossolo Amarelo Distrófico.

434 As equações Linear e Quadrática recomendadas pela fabricante do sensor CS616 não
435 são adequadas, pois subestimaram os valores da constante dielétrica aparente do solo para as
436 condições edafoclimáticas do Latossolo Amarelo Distrófico de Castanhal, sendo que a Linear
437 subestimou em 72,7 % e a quadrática 90,9 % a umidade volumétrica com melhores estimativas
438 para valores inferiores a $0,20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e piores para valores de umidade superiores a $0,30 \text{ cm}^3$
439 cm^{-3} .

440 O modelo físico de Roth et al. (1990) apresentou a pior avaliação na estimativa da
441 umidade volumétrica pela TDR, seguido de Topp et al. (1980), Ledieu et al. (1986) e Malicki
442 et al. (1996) com sofrível desempenho e Tommaselli e Bacchi (2001) classificado como

443 mediano, onde ambos superestimaram os valores da umidade do solo não sendo aplicáveis para
 444 o solo estudado.

445

446 **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

447 Almeida CAB, Antonino ACD, Pimentel RMM, Lira CABO, Lima JRS (2012) Influência da
 448 densidade na estimativa da umidade volumétrica em um Latossolo Vermelho-Amarelo. Revista
 449 Brasileira de Geografia Física 5 (5): 1056-1068. DOI:
 450 <https://doi.org/10.26848/rbgf.v5i5.232894>

451

452 ANA - Agência Nacional de Águas (2017) ATLAS Irrigação: uso da água na agricultura
 453 irrigada. Brasília. Disponível:
 454 <http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/AtlasIrrigacaoUsodaAguanaAgriculturaIrigada.pdf>. Acessado em 14 de janeiro de 2018.

455

456
 457 Bassegio D, Santos RF, Secco D, Souza SNM, Junior LAZ, Jadoski SO (2012) Variação do
 458 nível do lençol freático no crescimento de plantas daninhas. Revista Cultivando o Saber 5 (1):
 459 146-157.

460

461 Camargo AP, Sentelhas PC (1997) Avaliação do desempenho de diferentes métodos de
 462 estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. Revista Brasileira
 463 de Agrometeorologia 5 (1): 89-97.

464

465 Carvalho TRA de, Massaranduba W de M, Fontenele S de B, Landim RBT, Mendonça LAR
 466 (2015) Ajuste de modelo para determinar a umidade em Neossolo Flúvico com uso de uma
 467 sonda Time Domain Reflectometry (TDR). Revista Agrarian 8 (27): 57-63.

468

469 Coelho EF, Andrade CLT, Or D, Lopes LC, Souza CF (2001) Desempenho de diferentes guias
 470 de ondas para uso com o analisador de umidade Trase. Revista Brasileira de Engenharia
 471 Agrícola e Ambiental 5 (1): 81-87. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662001000100015>.

472

473
 474 Coelho EF, Vellame LM, Coelho Filho MA, Ledo CAS (2006) Desempenho de modelos de
 475 calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. Revista
 476 Brasileira de Ciência do Solo 30 (1): 23-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832006000100003>.

477

478
 479 Dutra CC, Prado EAF, Paim LR, Scalon SPQ (2012) Desenvolvimento de plantas de girassol
 480 sob diferentes condições de fornecimento de água. Semina: Ciências Agrárias 33 (1): 2657-
 481 2667. DOI: 10.5433/1679-0359.2012v33Supl1p2657.

482

483 Farias VD da S, Lima MJA de, Nunes HGGC, Sousa D de P, Souza PJ de OP de (2017) Water
 484 demand, crop coefficient and uncoupling factor of cowpea in the eastern Amazon. Revista
 485 Caatinga 30 (1): 190-200. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252017v30n121rc>

486

- 487 Francesca V, Osvaldo F, Stefano P, Paola RP (2010) Soil moisture measurements comparison
 488 of instrumentation performances. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 136 (2): 81-
 489 89. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2010\)136:2\(81\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2010)136:2(81)).
 490
- 491 Gonçalves ACA, Trintinalha MA, Tormenta CA, Folegatti MV (2011) Influencia da densidade
 492 do solo na estimativa da umidade em um nitossolo vermelho distroférico, por meio da técnica
 493 TDR. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 35 (5): 1551-1560. DOI:
 494 <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000500009>.
 495
- 496 Guimarães, CM, Costa CAG, Carneiro LF, Assunção HF da (2019) Response of the TDR sensor
 497 to moisture under different types of management of a typical Latosol in the Cerrado. *Revista*
 498 *Ciência Agrônômica* 50 (1): 1-7. DOI: <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20190001>.
 499
- 500 Jamieson PD, Porter JR, Wilson DR (1991) A test of the computer simulation model
 501 ARCWHEAT 1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research* 27 (4): 337-350.
 502 DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90040-3).
 503
- 504 Ledieu J, Ridder P de, Clerck P de, Dautrebande, S (1986) A method for measuring soil water
 505 moisture by time-domain reflectometry. *Journal of Hydrology* 88 (3-4): 319-328. DOI:
 506 [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90097-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90097-1).
 507
- 508 Lima JGA, Oliveira AS de, Souza L da S, Silva ND da, Viana PC (2018) Calibration of a soil
 509 moisture sensor with disturbed and undisturbed soil samples from Bahia. *Revista Brasileira de*
 510 *Engenharia Agrícola e Ambiental* 22 (10): 696-701. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n10p696-701>.
 511
- 512
- 513 Malicki MA, Plagge R, Roth CH (1996) Improving the calibration of dielectric TDR soil
 514 moisture determination taking into account the solid soil. *European Journal of Soil Science* 47
 515 (3): 357-366. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01409.x>.
 516
- 517 Murga-Orrillo H, Araujo WF, Rocha PRR, Sakazaki RT, Dionisio LFS, Vargas ARP (2016)
 518 Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do feijão-caupi cultivado em solo do cerrado
 519 submetido à cobertura morta. *Irriga* 21 (1): 172-187. DOI:
 520 <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v21n1p172-187>.
 521
- 522 R CORE TEAM (2018) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation
 523 for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <<https://www.R-project.org/>>.
 524
- 525 Roth CH, Schulin R, Fluhler H, Attinger W (1990) Calibration of time-domain reflectometry
 526 for water content measurement using composite dielectric approach. *Water Resources Research*
 527 26 (10): 2267-2273. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR026i010p02267>.
 528
- 529 Santana JAV, Coelho EF, Silva Junior JJ, Santana Junior EB, Veinromber Junior LAA (2012)
 530 Desempenho de sondas de TDR manufaturadas de diferentes comprimentos de hastes. *Revista*
 531 *Brasileira de Ciência do Solo* 36 (4): 1123-1130. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000400007>.
 532
- 533
- 534 Santos MR, Zonta JH, Martinez MA (2010) Influência do tipo de amostragem na constante
 535 dielétrica do solo e na calibração de sondas TDR. *Revista Brasileira de Ciências do Solo* 34 (2):
 536 299-307. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000200003>.

- 537
 538 Santos HG dos, Jacomine PKT, Anjos LHC dos, Oliveira VA de, Lumbreras JF, Coelho MR,
 539 Almeida JA de, Cunha TJF, Oliveira JB de (2013) Sistema brasileiro de classificação de solos.
 540 Brasília: Embrapa, 3 p. 353.
 541
- 542 Serrarens D, Macintyre JL, Hopmans JW, Bassoi LH (2000) Soil moisture calibration of TDR
 543 multilevel probes. *Scientia Agricola* 57 (2): 349-354. DOI: [http://dx.doi.org/10.1590/S0103-](http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162000000200024)
 544 90162000000200024.
 545
- 546 Silva EL & Gervásio ES (1999) Uso do instrumento TDR para determinação do teor de água
 547 em diferentes camadas de um Latossolo Roxo distrófico. *Revista Brasileira de Engenharia*
 548 *Agrícola e Ambiental* 3 (3): 417-420. DOI: [http://dx.doi.org/10.1590/1807-](http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v3n3p417-420)
 549 1929/agriambi.v3n3p417-420.
 550
- 551 Souza, PJ de OP de, Lima MJA, Farias VD da S, Ramos TE, Sousa AML de (2017) Biomass
 552 and leaf area production and yield of cowpea under regimes in Castanhal, Pará. *Revista Caatinga*
 553 30 (3): 748-759. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252017v30n323rc>.
 554
- 555 Souza RORM, Pantoja AV, Amaral MACM, Neto JAP (2012) Cenário da agricultura irrigada
 556 no estado do Pará. *Irriga* 17 (2): 177-188. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2012v17n2p177>.
 557
- 558 Souza CF, Silva CR da, Andrade Júnior AS de, Coelho EF (2016) Monitoramento do teor de
 559 água no solo em tempo real com as técnicas de TDR e FDR. *Irriga, Edição Especial*, 1 (1): 26-
 560 42. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v1n01p26-42>.
 561
- 562 Tommaselli JTG, Bacchi OOS (2001) Calibração de um equipamento de TDR para medida de
 563 umidade de solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 36 (9): 1145-1154. DOI:
 564 <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2001000900008>.
 565
- 566 Topp GC, Davis JL, Annan AP (1980) Eletromagnetic determination of soil water content:
 567 measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* 16 (3): 574-582. DOI:
 568 <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>.
 569
- 570 Wang F, Chen X, Luo G, Ding J, Chen X (2013) Detecting soil salinity with arid fraction
 571 integrated index and salinity index in feature space using Landsat TM imagery. *Journal Arid*
 572 *Land* 5 (3): 340 – 353. DOI: 10.1007/s40333-013-0183-x.
 573
- 574 Wilks DS (2006) *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. International Geophysics
 575 Series. Academic Press 91 (2): 649. Disponível:
 576 [http://danida.vnu.edu.vn/cpis/files/Books/Statistical%20methods%20in%20the%20atmospher-](http://danida.vnu.edu.vn/cpis/files/Books/Statistical%20methods%20in%20the%20atmospheric%20sciences,%20D.%20Wilks%20(2ed.,%20IGS%2091,%20Elsevier,%202006)(ISBN%200127519661)(649s).pdf)
 577 [ic%20sciences,%20D.%20Wilks%20\(2ed.,%20IGS%2091,%20Elsevier,%202006\)\(ISBN%20](http://danida.vnu.edu.vn/cpis/files/Books/Statistical%20methods%20in%20the%20atmospheric%20sciences,%20D.%20Wilks%20(2ed.,%20IGS%2091,%20Elsevier,%202006)(ISBN%200127519661)(649s).pdf)
 578 [0127519661\)\(649s\).pdf](http://danida.vnu.edu.vn/cpis/files/Books/Statistical%20methods%20in%20the%20atmospheric%20sciences,%20D.%20Wilks%20(2ed.,%20IGS%2091,%20Elsevier,%202006)(ISBN%200127519661)(649s).pdf). Acessado em 07 de fevereiro de 2019.
 579
- 580 Wilmott CJ, Ackleson SG, Davis RE, Feddema JJ, Klink KM, Legates DR, O'donnell J, Rowe
 581 CM (1985) Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical*
 582 *Research: Oceans* 90 (C5): 8995-9005. DOI: <https://doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>.

583 **3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL E FATOR DE RESPOSTA DO FEIJÃO-**
 584 **CAUPI AO DÉFICIT HÍDRICO NA FASE REPRODUTIVA NO NORDESTE**
 585 **PARAENSE**

587 **RESUMO**

588 A sensibilidade do feijão-caupi ao déficit hídrico no ambiente amazônico embora
 589 desconhecida, auxilia na gestão da água e otimização da produção anual e por área.
 590 Assim, objetivou-se neste trabalho estimar a evapotranspiração da cultura (ETc), real e
 591 avaliar o cultivo do feijão-caupi submetido a distintas lâminas de irrigação e seus efeitos
 592 nas fases e estádios fenológicos sobre o fator de resposta da produção (Ky) e da biomassa
 593 seca (Kss). Realizado na Fazenda Escola de Castanhal (PA) de 17/09/2016 a 28/11/2016,
 594 o experimento em blocos ao acaso, teve seis repetições e quatro tratamentos de
 595 restauração da ETc: T1 (100% ETc), T2 (50% ETc), T3 (25% ETc) e T4 (0% ETc),
 596 iniciados na fase reprodutiva da cultivar BR3-Tracuateua. A ETc total do feijão-caupi foi
 597 de 337.5, 284.35, 258.62 e 219.82 mm com consumo médio 4.6, 3.90, 3.54 e 3.01 mm
 598 dia⁻¹ para T1, T2, T3 e T4, respectivamente. A fase de emergência apresentou evaporação
 599 média de 5.19 mm dia⁻¹, a reprodutiva, vegetativa e senescência ETc média de 4.87, 4.84
 600 e 3.32 mm dia⁻¹, respectivamente. O estágio de floração obteve a maior demanda hídrica
 601 (5.88 mm dia⁻¹). As quedas no rendimento do grão foram de 18.91, 33.12 e 57.17% para
 602 T2, T3 e T4, tendo diferença significativa na produtividade de grãos entre todos os
 603 tratamentos pelo teste de tukey (P<0,05). O feijão-caupi apresentou Ky de 1.48 e Kss de
 604 2.03, 1.08 e 0.87 para os estádios de floração, enchimento de grãos e maturação
 605 fisiológica, respectivamente, tendo alta sensibilidade ao déficit hídrico nas condições
 606 edafoclimáticas do Nordeste paraense.

607
 608 Palavras-chave: coeficiente de sensibilidade, queda de produtividade, *Vigna unguiculata*
 609 (L.) Walp, balanço hídrico, demanda hídrica

611 **REAL EVAPOTRANSPIRATION AND RESPONSE FACTOR OF COWPEA TO**
 612 **THE WATER DEFICIT IN THE REPRODUCTIVE PHASE IN THE**
 613 **NORTHEAST PARAENSE**

615 **ABSTRACT**

616 The sensitivity of the cowpea to the water deficit in the Amazonian environment, although
 617 unknown, assists in water management and optimization of annual production and by
 618 area. The objective of this work was to estimate the evapotranspiration of the crop (ETc),
 619 real and to evaluate the cultivation of cowpea submitted to different irrigation slides and
 620 their effects on the phases and phenological stages on the production response factor (Ky)
 621 and of dry biomass (Kss). The experiment was carried out at Castanhal School Farm (PA)
 622 from 09/17/2016 to 11/28/2016. The experiment was performed in a randomized block
 623 design, with six replications and four ETc restoration treatments: T1 (100% ETc), T2 (50
 624 % ETc), T3 (25% ETc) and T4 (0% ETc), started in the reproductive phase of cultivar
 625 BR3-Tracuateua. The total ETc of the cowpea was 337.5, 284.35, 258.62 and 219.82 mm
 626 with average consumption 4.6, 3.90, 3.54 and 3.01 mm day⁻¹ for T1, T2, T3 and T4,
 627 respectively. The emergence phase presented average evaporation of 5.19 mm day⁻¹, the
 628 reproductive, vegetative and senescence mean ETc of 4.87, 4.84 and 3.32 mm day⁻¹,

629 respectively. The flowering stage obtained the highest water demand (5.88 mm day⁻¹).
630 The grain yield declines were 18.91, 33.12 and 57.17% for T2, T3 and T4, with a
631 significant difference in grain yield among all treatments by the tukey test (P <0.05).
632 Cowpea presented Ky of 1.48 and Kss of 2.03, 1.08 and 0.87 for flowering stages, grain
633 filling and physiological maturation, respectively, with high sensitivity to water deficit in
634 the edaphoclimatic conditions of Northeast of Pará.

635

636 Key words: sensitivity coefficient, fall of productivity, *Vigna unguiculata* (L.) Walp,
637 hydric balance, water demand

638

639

640

3.1 INTRODUÇÃO

641 O grão do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) apresenta no Estado do Pará
642 produtividade média de 821 kg ha⁻¹ (14.4 sc/ha⁻¹) com declínio desde 2013 devido ao
643 cultivo em sequeiro, irrigação por métodos não tradicionais, falta de informações e
644 assistência técnica nas propriedades produtoras (Souza et al., 2012; IBGE, 2017; Moreira
645 et al., 2017; SEDAP, 2017).

646 O rendimento de grãos do feijão-caupi é afetado com maior ou menor intensidade em
647 função da duração e da época da ocorrência do déficit hídrico, onde somente o
648 conhecimento da necessidade hídrica total da cultura, não se traduz em manejo eficiente
649 da irrigação, mas sim através da demanda hídrica nas suas diferentes fases e estádios
650 fenológicos (Azevedo et al., 2011), sendo o balanço hídrico um método preciso para
651 quantificar a evapotranspiração e avaliar o comportamento da planta em resposta a
652 distintas lâminas de irrigação (Payero & Irmak, 2013).

653 Pelo conhecimento da evapotranspiração, pode-se obter os fatores de resposta da
654 produção (Ky) e da biomassa seca (Kss) que elucidam a sensibilidade do feijão-caupi ao
655 déficit hídrico e podem maximizar a produção anual e por área, porém não há estimativas
656 na FAO 33 desses fatores para o feijão-caupi, somente para o feijão comum (*Phaseolus*
657 *vulgaris*) que apresenta alta sensibilidade ao déficit hídrico com Ky de 1.15 (Doorenbos
658 e Kassam, 1994; Patanè et al., 2011).

659 No Brasil, a sensibilidade do feijão-caupi ao efeito hídrico já foram observadas em
660 outros biomas (Cordeiro et al., 1998; Carvalho et al., 2000; Mousinho et al., 2008), sendo
661 fundamental conhecer sua resposta na Amazônia brasileira, tendo em vista a variação das
662 condições ambientais (Kaboosi e Kaveh, 2010), a necessidade de estudos técnicos em
663 períodos de menor precipitação e dos efeitos de lâminas de irrigação na produtividade e
664 a definição de sua utilização para os produtores do feijão-caupi.

665 Sendo assim, objetivou-se com esse trabalho estimar a evapotranspiração da cultura, a
666 evapotranspiração real e avaliar o efeito de distintas lâminas de irrigação sobre o fator de
667 resposta da produção (K_y) e da biomassa seca (K_{ss}) do feijão-caupi cultivar BR3-
668 Tracuateua nas condições edafoclimáticas do Nordeste do Estado do Pará.

669

670

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

671 3.2.1 Localização e caracterização

672 O experimento foi realizado em uma área de 3.168 m² na Fazenda Escola da
673 Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), localizada no município de Castanhal
674 (PA) (1°19'24.48" S e 47°57'38.20" W) com altitude de 41 m de 17/09/2016 a 28/11/2016
675 (equinócio de primavera) (Figura 1).

676

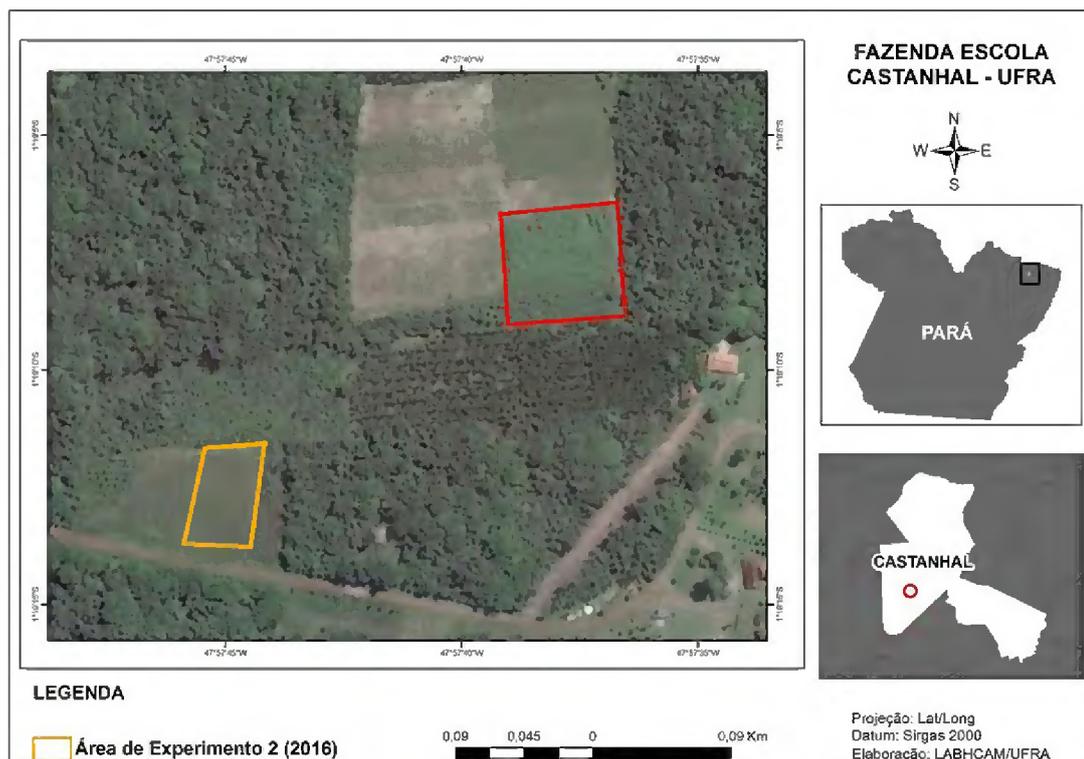
677

678

679

680

681



682

683 Figura 1. Localização da área do experimento no ano de 2016 na fazenda escola de Castanhal da Universidade Federal
684 Rural da Amazônia.

685

686 Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é "Am" do tipo quente e úmido
687 com temperatura média anual de 26 °C, com máximas e mínimas de 35 e 18 °C, umidade
688 relativa máxima de 95% e mínima de 79%, com precipitação média anual de 2.571,6 mm
689 onde 35% das chuvas concentram-se nos meses de janeiro, fevereiro e março e 16% nos
690 meses de julho, agosto e setembro (Souza et al., 2017).

691 Amostras deformadas e indeformadas com quatro repetições em cada profundidade e
692 tipo de amostra (Tabela 1) foram coletadas na área de estudo e analisadas no laboratório
693 de solos da Embrapa Amazônia Oriental. As amostras de solo apresentaram as seguintes
694 características químicas e físicas: 3.7 pH (H₂O); 20 P mg dm⁻³; 30 K⁺ mg dm⁻³; 1 Ca²⁺
695 cmol_c dm⁻³; 0.2 Mg cmol_c dm⁻³; 0.6 Al⁺ cmol_c dm⁻³; textura franco-arenosa, sendo 83.5%

696 areia, 12.5% silte e 4% argila; densidade do solo 1.56 g cm^{-3} , classificado como latossolo
 697 amarelo distrófico.

698

699 Tabela 1. Valores dos parâmetros da curva de retenção da água no solo pela equação de van Genuchten (1980) para
 700 as profundidades 0 a 40 cm

Profundidade (cm)	θ_s ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	θ_{cc} ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	θ_{pmp} ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	H_i (kPa)	α (cm^{-1})	S	n	m
0-20	0.26	0.21	0.12	17.4	0.0135	0.019	1.4143	0.2929
20-40	0.25	0.20	0.13	56	0.0031	0.021	1.6268	0.3853

701 θ_s - umidade no ponto de saturação; θ_{cc} - umidade no ponto de capacidade de campo; θ_{pmp} - umidade no ponto de
 702 murcha permanente; h_i - tensão no ponto de inflexão da curva; índice S - inclinação da curva de retenção no ponto de
 703 inflexão; α , n e m - parâmetros empíricos do modelo

704

705 A umidade volumétrica de água na capacidade de campo (θ_{cc}) e ponto de murcha
 706 permanente (θ_{pmp}) de $0.21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0.12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente, foram determinados
 707 na câmara de pressão de Richards e ajustados com a obtenção dos valores dos parâmetros
 708 da curva de retenção da água no solo (Tabela 1) através da equação 1 de van Genuthen
 709 (1980).

710

$$711 \quad \theta = \theta_{pmp} + \frac{\theta_s - \theta_{pmp}}{[1 + |\alpha \varphi m|^n]^m} \quad (1)$$

712

713 Onde:

714 θ_s - umidade no ponto de saturação do solo, $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$;

715 θ_{pmp} - umidade no ponto de murcha permanente do solo, $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$;

716 φ_m - potencial matricial, hPa;

717 α , n e m - constantes empíricas obtidas a partir da curva de retenção da água no solo.

718

719 O limite de água facilmente disponível (LAFD) de $0.17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ que é a umidade entre
720 a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, na qual as plantas absorvem
721 água sem que haja restrição que comprometa seu crescimento e desenvolvimento foi
722 obtido de acordo com Pereira et al. (2002).

723 3.2.2 Manejo da cultura

724 O solo da área experimental contou com preparo convencional (aração e gradagem),
725 calagem pelo método de saturação por bases, adubação de fundação com 195 kg ha^{-1} de
726 NPK 6-18-15 (uréia, superfosfato simples, cloreto de potássio), sendo o cloreto de
727 potássio dividido para adubação de fundação e cobertura trinta dias após a emergência, de
728 acordo com a análise química do solo e a recomendação de adubação para a cultura na
729 região, em sulcos de 5 cm da linha de plantio (EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL,
730 2005).

731 O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) cultivar BR3-Tracuateua de crescimento
732 indeterminado, porte prostrado, ciclo de 60-70 dias, foi plantada manualmente com
733 espaçamento de 0.5 m entre linhas e o semeio de quinze sementes/metro, tratadas com
734 fungicida Carbomax 500 SC (100 ml/400 ml de água) para 100 kg de sementes com
735 densidade de dez plantas/metro linear após o desbaste.

736 Os tratos culturais realizados durante o ciclo da cultura foram capina com enxada,
737 monda, amontoa. O controle para prevenção de doenças e pragas foi feito com a aplicação
738 por pulverizador costal dos inseticidas Decis 25 EC (3 ml/10 L de água) e Actara 250 WG
739 na proporção de 200 g ha^{-1} .

740 O monitoramento diário da fenologia do feijão-caupi foi feito em linhas de 1 metro
741 com 10 plantas adotando-se a recomendação de Fernández et al. (1986) (Figura 2) que

742 considera as fases fenológicas vegetativa e reprodutiva e os seguintes estádios de
743 desenvolvimento: V0 (germinação), V1 (cotilédone acima do solo), V2 (folhas
744 cotiledonares expandidas), V3 (primeira folha trifoliolada), V4 (terceira folha
745 trifoliolada), R5 (primeiro botão floral), R6 (antese da primeira flor), R7 (Primeira vagem
746 tipo canivete), R8 (enchimento de grãos) e R9 (maturação fisiológica) e a descrição de
747 Bastos et al. (2001).

748



749

750 Figura 2. Escala fenológica do feijão comum (Fernandez et al. 1986) adaptada para o feijão-caupi adotada no
751 monitoramento durante o cultivo no ano de 2016.

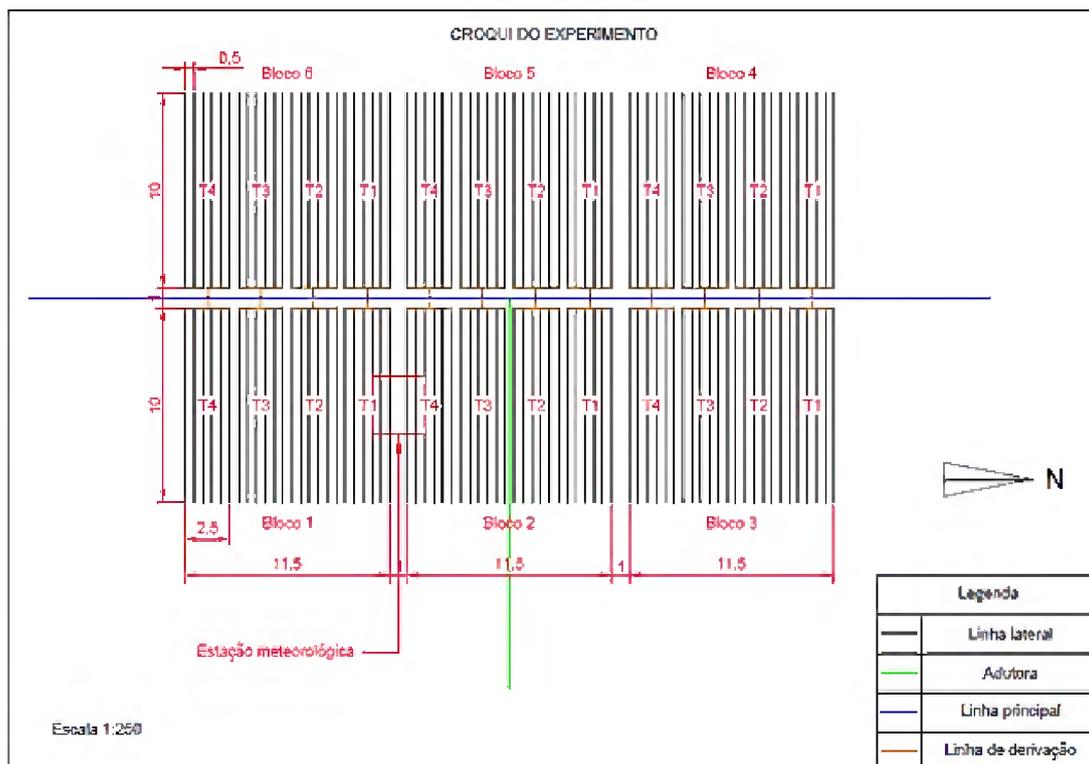
752

753 Considerou-se que a mudança de fase fenológica ocorreu quando 50% + 1 das plantas
754 da linha apresentaram as características de maior frequência de ocorrência inerente a cada
755 fase e estágio do feijão-caupi (Leite e Virgens Filho, 2004; Giunta et al., 2009).

756 3.2.3 Delineamento experimental

757 O delineamento experimental adotado foi o de blocos ao acaso (Figura 3), com 6
758 repetições onde cada bloco tinha uma área de 115 m² (11.5 x 10) e 4 tratamentos,
759 espaçados em 1 m, totalizando 24 unidades experimentais com 2.5 m de largura e 10 m

760 de comprimento espaçadas por 0.5 m, submetidas a 100% da restauração da
 761 evapotranspiração da cultura (ETc) com (irrigação + chuva) até o estágio (V4) para
 762 estabelecimento e uniformização da cultura que durou de 17/09 a 22/10 de 2016 com solo
 763 mantido em capacidade de campo.
 764



765

766 Figura 3. Layout do experimento com feijão-caupi realizado na fazenda escola de Castanhal em 2016.

767

768 Os tratamentos iniciaram quando o plantio atingiu a fase reprodutiva (R5) e realizados
 769 da seguinte forma: T1 (100% de restauração da ETc), T2 (50% de restauração da ETc),
 770 T3 (25% de restauração da ETc) e T4 (0% de restauração da ETc). No tratamento T4
 771 foram construídas coberturas móveis de polipropileno transparente de 100 microns com
 772 altura de 1.5 m para cada bloco, a fim de, impedir entrada de água, sendo montadas apenas
 773 na ocorrência de chuva e durante o dia (Figura 4).



774

775 Figura 4. Coberturas móveis de polipropileno transparente construídos em cada bloco no tratamento 4 para impedir
776 entrada de água na ocorrência de chuva durante o dia.

777

778 Com turno de rega diário, as lâminas foram aplicadas pelo sistema de irrigação por
779 gotejamento através de emissores do tipo in-line, com espaçamento de 20 cm (100
780 emissores/linha) e fitas gotejadoras de polietileno aditivado (16 mm) na superfície do solo
781 atendendo uma linha de plantio de 10 m.

782 As fitas foram conectadas as linhas de derivação e estas a linha principal, ambas de
783 tubo PVC DN 50/ PN 40, que continha registros de esfera para o controle dos tratamentos
784 e um filtro de disco inserido no final da tubulação de recalque para evitar entupimento
785 nos emissores. O sistema foi alimentado por uma bomba elétrica submersa de 2 cv em um
786 poço artesiano de 40 m e operou numa pressão de serviço de 5 mca.

787 3.2.4 Cálculos

788 O coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) (equação 2) do sistema de 88%
789 classificado como bom segundo Merriam e Keller (1978), foi obtido através de recipientes
790 coletores de 2000 ml enterrados com a parte superior nivelado ao solo, distribuídos no

791 início, meio e final das fitas, com captura de três emissores por 20 min, nos quatros
792 tratamentos de todos os blocos com três repetições.

793 Obteve-se vazão média de 1 L h^{-1} por gotejador numa pressão de serviço de 5 mca. A
794 eficiência do sistema (E_a) de irrigação determinada pela expressão 3 de 80%, foi
795 classificada como aceitável de acordo com Bernardo et al. (2006).

796

$$797 \quad \text{CUD} = \left(\frac{q^{25}}{q} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$798 \quad E_a = 0.9 \times \text{CUD} \quad (3)$$

799

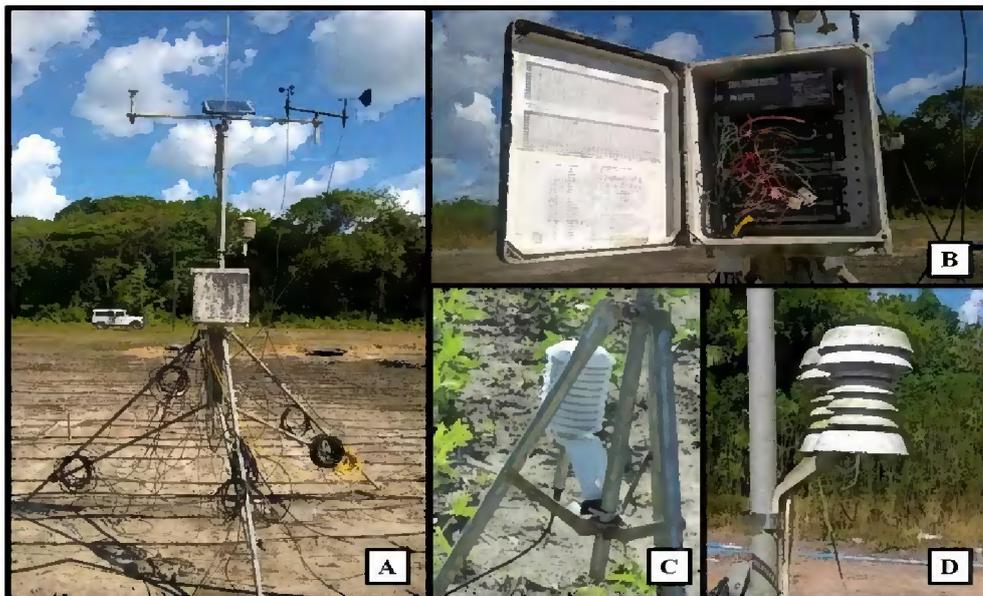
800 Onde:

801 q^{25} - média de 25% do total dos gotejadores com as menores vazões, L h^{-1} ;

802 q - vazão média dos gotejadores, L h^{-1} .

803

804 Na área do plantio foi instalada uma torre micrometeorológica de 3 m de altura com
805 uma estação meteorológica automática de superfície com finalidade agrometeorológica
806 com medição da temperatura e umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento,
807 chuva, radiação solar global e umidade do solo com sensores conectados ao data logger
808 CR10X (Campbell Scientific. Inc., Logan, Utah, USA-CSI) e a um multiplexador AM416
809 (Campbell Scientific, Inc.) com leituras programadas para cada 10 segundos e
810 armazenamento das médias a cada 10 minutos (Figura 5).



811

812 Figura 5. Torre micrometeorológica (A), estação meteorológica automática (B), sensor de temperatura e umidade
 813 relativa do ar a 0,5 m (C) e 2 m (D) acima do dossel.

814

815 Pelo método micrometeorológico de Penman-Monteith FAO 56 (equação 4) foram
 816 estimados os valores diários de evapotranspiração de referência (ET_o) (Allen et al., 1998)
 817 com dados da estação meteorológica automática de superfície com finalidade sinótica do
 818 Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de Castanhal, localizada à 3 km da área do
 819 plantio.

820

$$821 \quad ET_{OPM} = 0,408\Delta(R_a - G) + \gamma(900/T + 273)U_2(e_s - e_a)/\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2) \quad (4)$$

822

823 Onde:

824 ET_{OPM} - evapotranspiração de referência, mm dia⁻¹;

825 R_a - radiação no topo da atmosfera, MJ m⁻² dia⁻¹;

826 G - fluxo de calor no solo, MJ m⁻² dia⁻¹;

827 T - temperatura do ar a 2 m de altura, °C;

828 U₂ - velocidade média diária do vento à altura de 2 m, m s⁻¹;

829 $(e_s - e_a)$ - déficit de pressão de vapor, kPa;

830 Δ - declividade da curva de pressão de vapor de saturação, kPa °C⁻¹;

831 γ - constante psicrométrica, kPa °C⁻¹.

832

833 Os valores de coeficiente da cultura (K_c) obtidos por Farias et al. (2017) para o feijão-
834 caupi cultivar BR3-Tracuateua nas fases inicial, vegetativa, reprodutiva e final de 0.8,
835 1.3, 1.4 e 0.6, respectivamente, foram usados para determinar a ET_c durante o
836 experimento (equação 5).

$$837 \quad ET_c = ET_o \times K_c \quad (5)$$

838

839 As irrigações foram realizadas diariamente a partir da ET_c do dia anterior, sendo a partir
840 dela calculada a lâmina líquida (equação 6) e a lâmina bruta considerando a razão entre a
841 lâmina líquida e a eficiência de aplicação de água do sistema de irrigação (equação 7)
842 com a diferenciação para cada tratamento de reposição da água no solo em relação a
843 testemunha (T1). A chuva efetiva obtida com o pluviômetro instalado na torre
844 micrometeorológica foi descontada no cálculo de reposição realizada pelo sistema de
845 irrigação.

846

$$847 \quad LL = ET_c - P_e \quad (6)$$

$$848 \quad LB = LL / E_a \quad (7)$$

849

850 Onde:

851 LL - lâmina líquida de irrigação, mm;

852 ET_c - evapotranspiração da cultura, mm dia⁻¹;

853 P_e - chuva efetiva, mm;

854 EF - eficiência de aplicação de água, decimal;

855 LB - lâmina bruta da irrigação, mm.

856

857 A evapotranspiração real (ETr) foi estimada pelo método do balanço hídrico
858 simplificado (equação 8) com medição das variáveis diariamente, onde a profundidade
859 efetiva do sistema radicular do feijão-caupi irrigado é de 0 a 30 cm (Cardoso et al., 2017).

860 Considerou-se nulos, a ascensão capilar desprezível em solos profundos como
861 latossolos (Pereira et al., 1997), escoamento superficial (terreno plano e naturalmente bem
862 drenado) e drenagem profunda devido o monitoramento diário das entradas de
863 precipitação e irrigação pela TDR. Nos tratamentos com a redução das lâminas de
864 irrigação foi obtida a ETr.

865

$$866 \quad ETr = P + I \pm \Delta h \quad (8)$$

867

868 Onde:

869 ETr - evapotranspiração real, mm;

870 P – precipitação, mm;

871 I – irrigação, mm;

872 Δh - variação de armazenamento, mm.

873

874 Para o monitoramento da variação da umidade volumétrica de água no solo foram
875 inseridos verticalmente em cada tratamento um sensor CS616 (Campbell Scientific Inc.,
876 Utah, USA-CSI) de 30 cm, anteriormente calibrados com amostras indeformadas do solo
877 da área experimental pela relação da umidade volumétrica obtida pelo método
878 gravimétrico e as leituras diárias da constante dielétrica aparente do solo (K_a) e da

879 umidade volumétrica de água no solo (θ) estimada pelo sensor com equação de regressão
880 linear.

881 Em cada unidade experimental composta por 6 linhas de plantio de 10 m de
882 comprimento espaçadas de 0.5 m foram selecionadas cinco plantas aleatoriamente nas
883 duas linhas centrais com uma área útil de 15 m² para compor uma amostra composta de
884 folhas, hastes (pecíolo, pedúnculo e caule) e legume (vagem e grão) que foram separados
885 e secos na estufa a 70 °C por 72 h para determinação da biomassa seca em uma balança
886 de precisão 0.01g (Figura 6). As linhas laterais de cada unidade experimental foram
887 usadas como bordadura.

888



889

890 Figura 6. Biomassa do feijão-caupi coleta e separada (A) para pesagem na balança de precisão (B) levados a estufa
891 numa temperatura média de 70 °C (C).

892

893 A colheita dos grãos ocorreu no dia 28/11/2016 aos 72 dias após a semeadura (DAS)
894 manualmente quando 90% das plantas atingiram o estágio R9. Foi avaliado o número de
895 grãos, através do método do quadrante de 1 x 1 m com três repetições aleatoriamente em
896 cada tratamento em duas linhas de plantio de 2 m.

897 Os fatores de resposta que quantificam as perdas no rendimento dos grãos (K_y) e
 898 perdas de biomassa seca (K_{ss}) nos estádios pelo déficit de evapotranspiração relativa
 899 foram calculados através das equações 9 e 10 (Doorenbos e Kassam, 1979; Patané et al.,
 900 2011).

901

$$902 \quad \left(1 - \frac{Y_r}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_r}{ET_c}\right) \quad (9)$$

903

$$904 \quad \left(1 - \frac{SS_r}{SS_m}\right) = K_{ss} \left(1 - \frac{ET_r}{ET_c}\right) \quad (10)$$

905

906 Onde:

907 Y_m - rendimento dos grãos sem restrição hídrica, kg ha^{-1} ;908 Y_r - rendimento dos grãos submetidos a restrição hídrica, kg ha^{-1} ;909 SS_m - rendimento da biomassa sem restrição hídrica, kg ha^{-1} ;910 SS_r - rendimento de biomassa submetidos a restrição hídrica, kg ha^{-1} ;911 K_y - fator de resposta de rendimento dos grãos, adimensional;912 K_{ss} - fator de resposta da biomassa seca, adimensional.

913 **3.2.5 Análise dos dados**

914 Os dados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade
 915 (Bartlett). A análise de variância (ANOVA) foi aplicada considerando o delineamento
 916 experimental, a fim de, verificar se houve diferença significativa na produtividade dos
 917 grãos obtida nos tratamentos. Pelo teste de Tukey, avaliou-se a diferença significativa

918 entre as médias de produtividade, ao nível de confiança de 5% de probabilidade. A análise
 919 estatística foi realizada no software R (R, 2018).

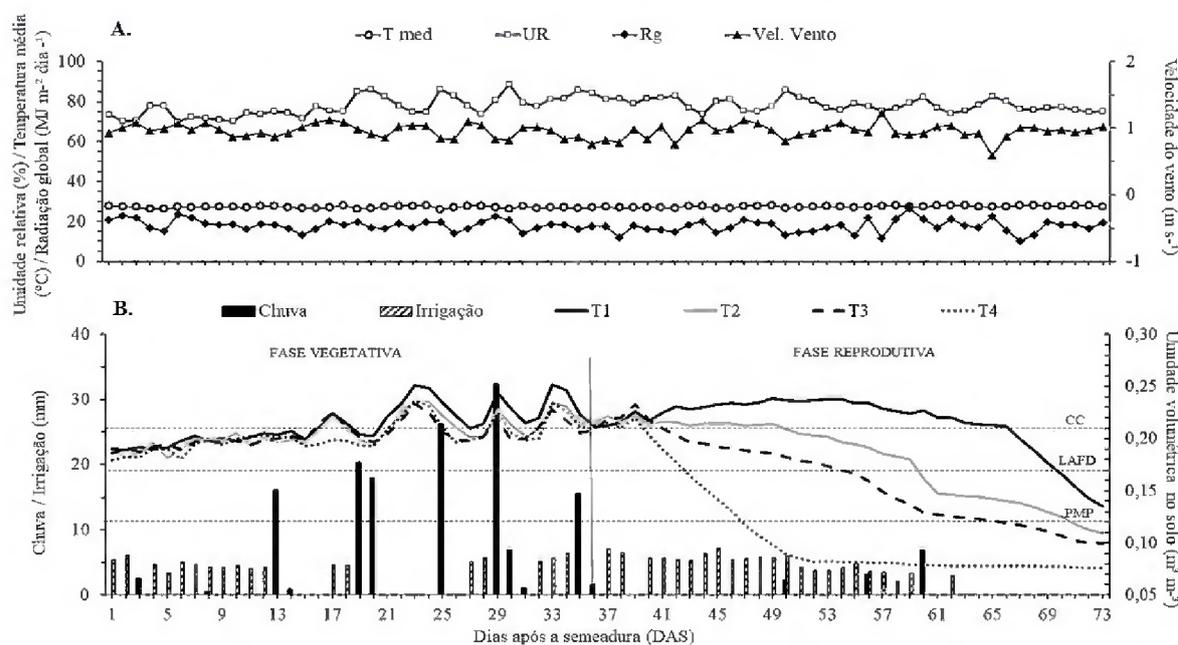
920 A classificação da sensibilidade ao déficit hídrico em: baixa sensibilidade
 921 ($K_y; K_{ss} < 0.85$); baixa/média sensibilidade ($0.85 < K_y; K_{ss} < 1$); média/alta sensibilidade
 922 ($1 < K_y; K_{ss} < 1.15$) e alta sensibilidade ($K_y; K_{ss} > 1.15$) foi realizada de acordo com
 923 Doorenbos e Kassam (1979).

924

925 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

926 As variáveis agrometeorológicas, os dias de lâminas de irrigação aplicadas, assim
 927 como as condições e características do solo durante o experimento que durou desde a
 928 germinação até a colheita (68 dias) são observadas na figura 7.

929



930

931 Figura 7. Valores médios diários de temperatura, umidade relativa do ar e radiação global (A). Médias diárias de
 932 umidade do solo, capacidade de campo (CC), limite de água facilmente disponível (LAFD) e ponto de murcha
 933 permanente (PMP). Valores totais diários de chuva e irrigação durante o cultivo do feijão-caupi, cultivar BR3-
 934 Tracueteua em Castanhal, Pará, 2016 (B)

935

936 O T2 e T3 receberam lâminas inferiores ao T1 durante a fase reprodutiva e mais a
 937 chuva, totalizando 354.82, 297.10, 269.46 e 228.82 mm para o T1, T2, T3 e T4,
 938 respectivamente, durante todo o experimento (Tabela 2).

939

940 Tabela 2. Quantitativo de água disponibilizada através de lâminas de irrigação e chuva durante o cultivo do feijão-
 941 caupi. Análise de variância e teste de tukey do parâmetro de produtividade de grãos (PG) da cultivar BR3-Tracueteua
 942 em Castanhal, Pará, 2016

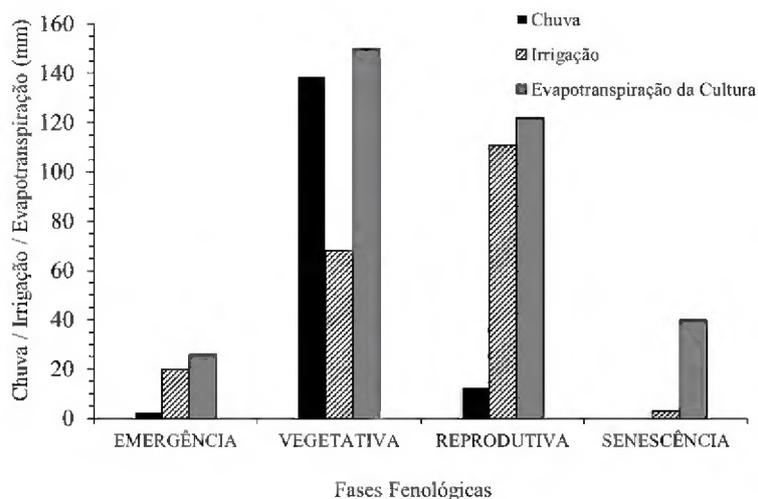
Disponibilidade Hídrica (mm) e Produtividade de Grãos (kg ha ⁻¹)							
Tratamentos	Fase Vegetativa		Fase Reprodutiva		Total	Nº de Irrigações	PG
	Chuva	Irrigação	Chuva	Irrigação			
T1 (100% da ETc)				113.8	354.8	40	1.597 a*
T2 (50% da ETc)	141.2	87.6	12.2	56.1	297.1	40	1.295 b
T3 (25% da ETc)				28.4	269.5	40	1.069 c
T4 (0% da ETc)			0	0	228.8	17	684 d

943 * Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (P<0,05)

944

945 A partir da divisão do ciclo do feijão-caupi, observou-se que a fase vegetativa
 946 apresentou os maiores valores totais de ETc (149.93 mm) (Figura 8), devendo-se ao
 947 elevado potencial de água no solo e a duração da fase (31 dias) (Tabela 3). A fase
 948 reprodutiva apresentou a segunda maior ETc total (121,84 mm), seguida da senescência
 949 (41.09 mm) e emergência (25.97 mm).

950



951

952 Figura 8. Chuva, irrigação e evapotranspiração da cultura do feijão-caupi em suas diferentes fases e estádios fenológicos em
953 Castanhal, 2016

954

955 As fases fenológicas do feijão-caupi em ordem decrescente de maior duração foram:
956 vegetativa, reprodutiva, senescência e emergência (Tabela 3), sendo que a emergência
957 devido ao solo está sem cobertura e recebendo radiação solar direta apresentou a maior
958 evaporação média (5.19 mm dia^{-1}), seguida da fase reprodutiva, vegetativa e senescência
959 com evapotranspiração média de 4.87 , 4.84 e 3.32 mm dia^{-1} , respectivamente.

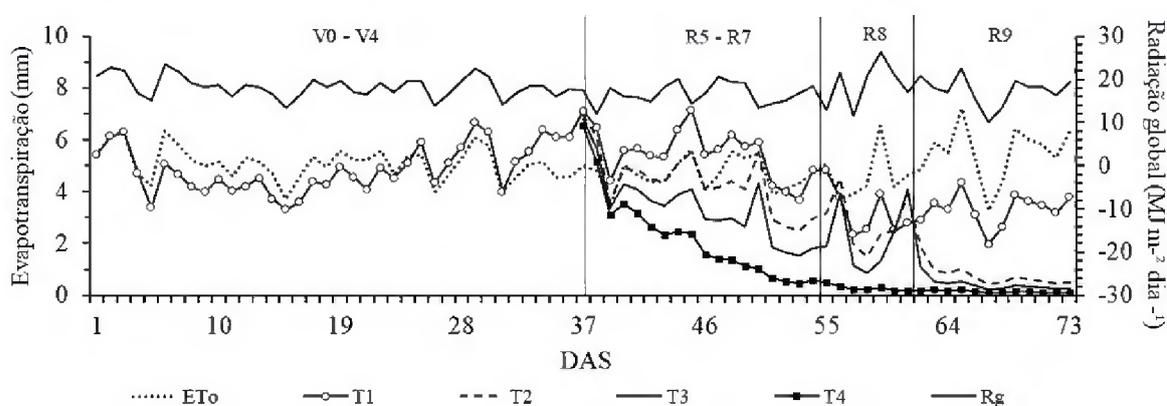
960

961 Tabela 3. Período de cada fase fenológica e evapotranspiração da cultura média do feijão-caupi, cultivar BR3-
962 Tracueteua em Castanhal, Pará, 2016

Fase Fenológica	Duração	Nº Dias	ETc (mm dia^{-1})
Emergência	18/09 a 21/09	4	5.19 ± 1.18
Vegetativo	22/09 a 22/10	31	4.84 ± 0.88
Reprodutivo	23/10 a 16/11	25	4.87 ± 1.41
Senescência	17/11 a 28/11	12	3.32 ± 0.62

963

964 Quando se observa a ET_c obtida no T1 nos estádios do feijão-caupi, a floração (R5)
 965 apresentou a maior demanda hídrica com um consumo médio de 5.88 mm dia^{-1} , o que
 966 justifica a maior lâmina aplicada em relação aos demais tratamentos durante a fase
 967 reprodutiva, seguida da fase vegetativa e os estádios de enchimento de grãos e maturação
 968 fisiológica com 4.8, 3.59 e 3.21 mm dia^{-1} , respectivamente (Figura 9), situação
 969 corroborada por Farias et al. (2017).
 970



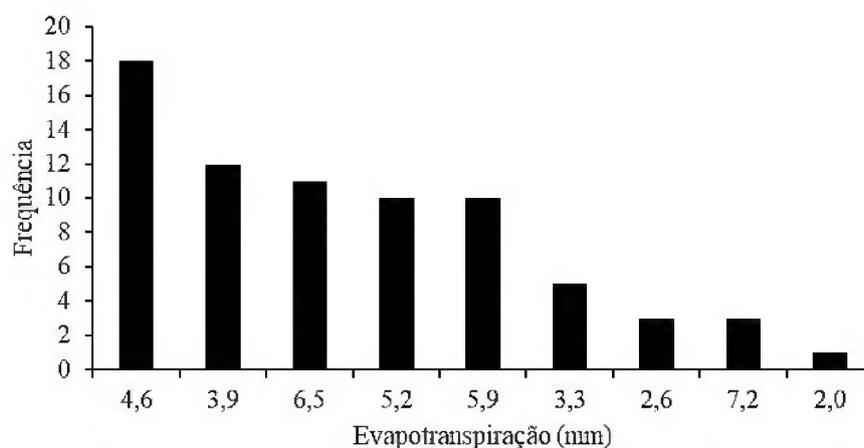
971

972 Figura 9. Evapotranspiração de referência (ET_0), evapotranspiração da cultura (T1) e real (T2, T3 e T4) do feijão-caupi
 973 durante o cultivo nas fases vegetativa (V) e reprodutiva (R) e radiação global nos meses de setembro a novembro de
 974 2016 em Castanhal, PA

975

976 O T1 durante o experimento apresentou uma ET_c total de 337.5 mm e consumo médio
 977 de 4.6 mm dia^{-1} . Com a diminuição das lâminas de irrigação aos 36 DAS (Figura 7B), os
 978 tratamentos T2, T3 e T4 apresentaram uma ET_r total e média de 284.35, 258.62 e 219.82
 979 mm e 3.90 , 3.54 e 3.01 mm dia^{-1} (Figura 9) obtendo uma deficiência acumulada de 53.17,
 980 78,90 e 117.70 mm, respectivamente.

981 Os valores de ET_c mais frequentes (Figura 10) durante o cultivo do feijão-caupi foram:
 982 4.6, 3.9, 6.5, 5.2, 5.9, 3.3, 2.6, 7.2 e 2 mm dia^{-1} , ambos influenciados pelas condições
 983 ambientais (Figura 7), crescimento e desenvolvimento da planta.



984

985 Figura 10. Distribuição de frequência da evapotranspiração da cultura do feijão-caupi no ano de 2016 em Castanhal,
986 Pará.

987

988 Devido a ocorrência de chuva, houve uma variação na umidade do solo (Figura 7B)
989 assim como na E_{Tc} e E_{Tr} (Figura 9), mas não ao ponto de alterar o status hídrico das
990 plantas, sendo que houve o desconto no cálculo da lâmina de irrigação da chuva efetiva
991 de 2.29, 3.05 e 6.86 mm (Figura 7B), além do que, o monitoramento da umidade do solo
992 pela TDR permitiu avaliar a necessidade da irrigação após o fenômeno em tempo real.

993 Observa-se na figura 9, o comportamento da radiação global com média de 17.8 MJ
994 $m^{-2} \text{ dia}^{-1}$ influenciando na variabilidade das evapotranspirações que durante a fase
995 vegetativa até os 23 DAS, a E_{To} foi superior a E_{Tc} com o solo mantido em capacidade
996 de campo para atender a demanda evaporativa atmosférica que apresentou médias de
997 temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento de 27.2 °C, 77.8%, 1 $m \text{ s}^{-1}$,
998 respectivamente (Figura 7A).

999 Após os 24 DAS, a E_{Tc} do feijão-caupi foi maior que a E_{To} até aos 57 DAS, atingindo
1000 os maiores valores de E_{Tc} com máxima de 7.15 $mm \text{ dia}^{-1}$, sendo essa mudança de
1001 comportamento entre a E_{Tc} e E_{To} devida ao aumento do índice de área foliar,
1002 transpiração e cobertura do solo (Farias et al., 2017).

1003 A diminuição da ET_c aos 55 DAS, deu-se com o início do estágio de enchimento de
1004 grãos estendendo-se até a maturação fisiológica com a senescência. Para os tratamentos
1005 com redução da lâmina, a diminuição da ET_r observada na figura 9, agravou-se com a
1006 secagem do solo pelas condições climáticas impostas (Figura 7).

1007 Aliado a diminuição do potencial de água no solo, a ET_o condicionando condições de
1008 alta demanda evaporativa atmosférica com total, máxima, mínima e média de 368.84,
1009 6.55, 3.53 e 5.05 mm dia⁻¹, fizeram com que possivelmente a planta realizasse maior
1010 controle da transpiração, principalmente nos horários de elevadas temperaturas do ar, o
1011 que corrobora com a queda da produtividade dos grãos (Tabela 2).

1012 Porém, aos 61 DAS quando o estágio de maturação dos grãos foi iniciado, a irrigação
1013 foi interrompida para todos os tratamentos, sendo que a fase de senescência apresentou
1014 elevados valores de ET_c mesmo após a suspensão da irrigação no T1, devido a maior
1015 quantidade de água no solo e a diminuição da cobertura da área (Figura 8).

1016 Os tratamentos T2, T3 e T4 atingiram o limite de água facilmente disponível aos 60,
1017 55 e 43 DAS, respectivamente (Figura 7B). Observa-se que o ponto de murcha
1018 permanente foi atingido aos 71, 67 e 47 DAS para o T2, T3 e T4, respectivamente.

1019 Embora expostas a condições de déficit hídrico indicada pelas variáveis físicas
1020 qualitativas do solo, as plantas não apresentaram características de murchamento
1021 fisiológico em campo, pois a resposta a essa condição varia com a espécie e com fatores
1022 inerentes do solo e da atmosfera, podendo a planta entrar em repouso fisiológico, porém
1023 reduzindo a multiplicação celular (Leite e Virgens Filho, 2004; Reichardt e Timm, 2004).

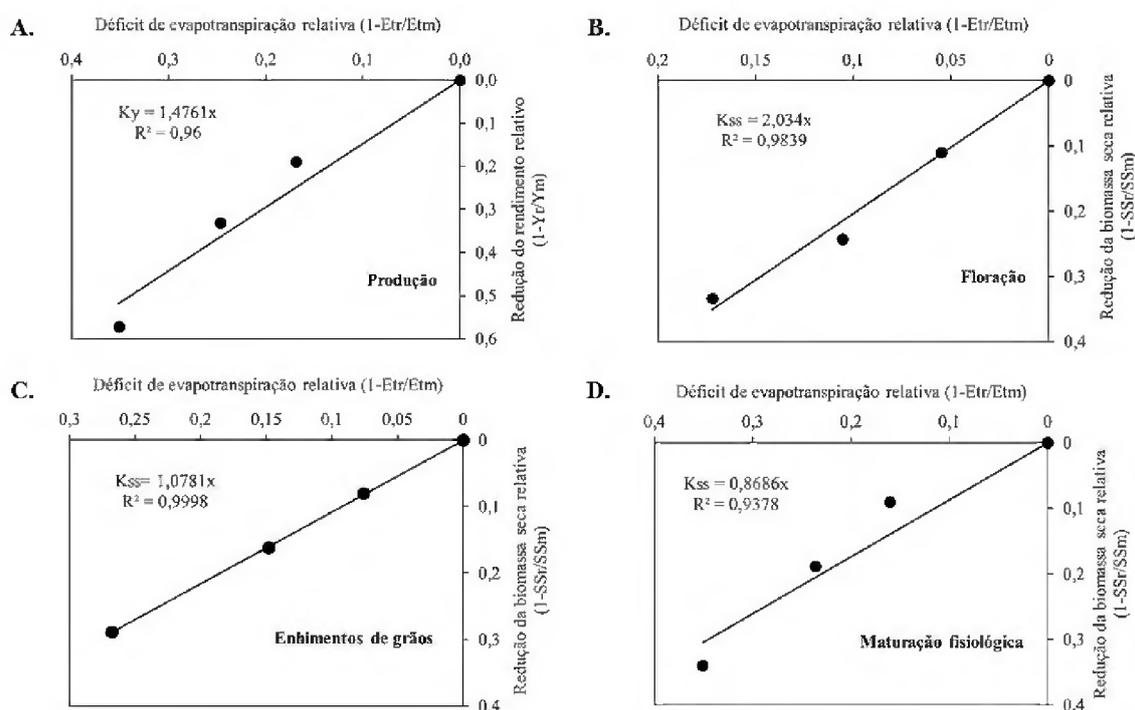
1024 Verificou-se pela ANOVA (Tabela 2) diferença significativa na produtividade de
1025 grãos do feijão-caupi ($P < 0,05$) onde pelo teste de Tukey as médias dos quatro tratamentos
1026 diferiram entre si, onde a produtividade obtida no T1 (1.597 kg ha⁻¹) demonstra o

1027 potencial da cultura no Estado do Pará assemelhando-se as produções planejadas das
1028 regiões Centro-Oeste e Sudeste do Brasil (Menezes Junior et al., 2017).

1029 O coeficiente angular da equação de regressão linear indicou K_y de 1.48 (Figura 11A)
1030 para a queda no rendimento de grãos com a redução da evapotranspiração no feijão-caupi,
1031 sendo este acentuado na medida em que a restrição hídrica aumentou no solo, onde o T2
1032 foi o que apresentou menor K_y , quando comparado ao T3 e T4.

1033 O T2, T3 e T4 apresentaram uma diminuição da evapotranspiração relativa de 21, 31
1034 e 42% e produtividade do feijão-caupi de 1.295, 1.068 e 684 kg ha⁻¹ de grãos (Tabela 2)
1035 com redução em 18.91, 33.12 e 57.17% (Figura 11A), mediante a diminuição da
1036 reposição da água no solo realizada na fase reprodutiva da planta.

1037



1038

1039 Figura 11. Relação entre a diminuição no rendimento relativo comercializável do grão (1-Yr/Ym) (A), diminuição da
1040 biomassa seca relativa (1-SSr/SSm) nos estádios fenológicos de floração (B), enchimento de grãos (C) e maturação
1041 fisiológica (D) com o déficit de evapotranspiração relativa (1-Etr/Etm) do feijão-caupi, cultivar BR3-Tracuateua, no
1042 período reprodutivo, Castanhal, Pará

1043

1044 As perdas de biomassa seca variaram de 10 a 30% aproximadamente (Figura 11B,
1045 11C, 11D), onde o estágio de floração ($K_{ss}= 2.03$) apresentou maior sensibilidade ao
1046 déficit hídrico, seguido do enchimento de grãos ($K_{ss}= 1.08$) e do estágio de maturação
1047 fisiológica que apresentou baixa a média sensibilidade (K_{ss} de 0.87), resultados que se
1048 assemelham aos obtidos por Doorenbos e Kassam (1994) e Carvalho et al. (2000) e difere
1049 dos obtidos por Cordeiro et al. (1998) onde o feijão-caupi apresentou baixa sensibilidade
1050 ao déficit hídrico e o estágio de enchimento de grãos foi o mais sensível.

1051 Os valores de K_{ss} maiores para floração podem ter ocorrido devido à restrição hídrica
1052 abrupta iniciada na fase reprodutiva que reduz a ET fazendo a E_{Tr} seja menor que a E_{Tc} ,
1053 assim como também ao tempo de duração e da maior demanda hídrica da fase e do estágio
1054 fenológico, onde para Endres et al. (2010) a falta de água no estágio de floração da planta,
1055 promove a redução grave da produção.

1056 Observou-se há existência de uma variabilidade entre os valores dos fatores de resposta
1057 que para Doorenbos e Kassam (1994) é devida a climatologia de cada local que é
1058 influenciada pelas variáveis agrometeorológicas, evapotranspiração, irrigação, nutrição,
1059 genótipo, solo e a divisão do ciclo fenológico da planta resultando em divergência entre
1060 os valores, além do que, os autores ratificam que não se dispõe de valores universais, mas
1061 apenas de valores obtidos para comparação baseado em experimentos realizados a campo,
1062 onde nas condições ambientais da Amazônia oriental o feijão-caupi apresentou alta
1063 sensibilidade ao déficit hídrico com ênfase para o estágio de florescimento.

1064

3.4 CONCLUSÃO

1065

1066 1. O feijão-caupi obteve uma evapotranspiração total no T1, T2, T3 e T4 de 337.5,
1067 284.35, 258.62 e 219.82 mm e consumo médio de 4.6, 3.90, 3.54 e 3.01 mm dia⁻¹,
1068 respectivamente, com maiores valores na fase vegetativa.

1069 2. A emergência (5.19 mm dia⁻¹) apresentou a maior evaporação média, seguida da
1070 ETc média nas fases reprodutiva (4.87 mm dia⁻¹), vegetativa (4.84 mm dia⁻¹) e
1071 senescência (3.32 mm dia⁻¹), onde o estágio de floração do feijão-caupi apresentou a
1072 maior demanda hídrica (5.88 mm dia⁻¹).

1073 3. Os estádios fenológicos que apresentaram os maiores valores de Kss foram floração
1074 (2.03), enchimento de grãos (1.08) com alta sensibilidade, tendo a maturação baixa a
1075 média sensibilidade ao déficit hídrico (0.87).

1076 4. A redução da lâmina de irrigação na fase reprodutiva provou perdas de grãos do
1077 feijão-caupi que variaram de 18.91 a 57.17% e perdas de biomassa de 10 a 30%,
1078 indicando que a planta possui alta sensibilidade ao déficit hídrico com Ky de 1.48, sendo
1079 recomendada a irrigação na fase reprodutiva pelos produtores de feijão-caupi no Nordeste
1080 Paraense no período de menor precipitação.

1081

1082 LITERATURA CITADA

1083

1084 Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for
1085 computing crop water requirements. Rome: Food and Agriculture Organization, 1998.
1086 300p. Drainage and Irrigation Paper, 56.

1087

1088 Azevedo, B. M.; Fernandes, C. N. V.; Pinheiro, J. A.; Braga, E. S.; Campêlo, A. R.; Viana,
1089 T. V. de A.; Marinho, A. B. Efeitos de lâminas de irrigação na cultura do feijão vigna de
1090 cor preta. Agropecuária Técnica, v. 32 n.1, p.152-159, 2011.

1091

1092 Bastos, E. A.; Folegatti, M. V.; Faria, R. T.; Andrade Júnior, A. S.; Cardoso, M. J.
1093 Simulation of growth and development of irrigated cowpea in Piauí State by CROPGRO
1094 model. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.37, n.10, p.1381-1387, 2001.

1095

- 1096 Bernardo, S.; Soares, A. A.; Mantovani, E. C. Manual de Irrigação. 8.ed. Viçosa: UFV,
1097 2006, 625p.
1098
- 1099 Cardoso, M. J.; Bastos, E. A.; Andrade Júnior, A. S. de; Sobrinho, C. A. Feijão-caupi: o
1100 produtor pergunta, a Embrapa responde. Editores técnicos. Brasília, DF: Embrapa, 2017.
1101
- 1102 Carvalho, J. A.; Pereira, G. M.; Andrade, M. J. B.; Roque, M. W. Efeito do déficit hídrico
1103 sobre o rendimento do feijão caupi [*Vigna unguiculata* (L.) Walp]. *Ciência e*
1104 *Agrotecnologia*, v.24, n.3, p.710-717, 2000.
1105
- 1106 Cordeiro, L. G.; Bezerra, F. M. L.; Santos, J. J. A.; Miranda, E. P. Fator de sensibilidade
1107 ao déficit hídrico da cultura do feijão Caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). *Revista*
1108 *Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.2, n.2, p.153-157, 1998.
1109
- 1110 Doorenbos, J.; Kassam, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina
1111 Grande: UFPB, 1994. 306p. Estudos da FAO: Irrigação e Drenagem, 33.
1112
- 1113 Doorenbos, J.; Kassam, A. H. Yield Response to Water. Rome: Food and Agriculture
1114 Organization, 1979. 193p. Irrigation and Drainage Paper, 33.
1115
- 1116 EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Cultivar de Feijão Caupi:
1117 BR3 – Tracuateua purificada para o estado do Pará. Ano 2005. Disponível em:
1118 <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/br3tracuateua_000fljvhfns02wyiv8](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/br3tracuateua_000fljvhfns02wyiv80lcx0a9xtkboga.pdf)
1119 [0lcx0a9xtkboga.pdf](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/br3tracuateua_000fljvhfns02wyiv80lcx0a9xtkboga.pdf)>. Acesso em: 28 Out. 2017.
1120
- 1121 Endres, L.; Souza, J. L.; Teodoro, L.; Marroquim, P. M. G.; Santos, C. M.; Brito, J. E. D.
1122 Gas exchange alteration caused by water deficit during the bean reproductive stage.
1123 *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.11- 16, 2010.
1124
- 1125 Farias, V. D. da S.; Lima, M. J. A. de.; Nunes, H. G. G. C.; Sousa, D. de P.; Souza, P. J.
1126 de O. P. de. Water demand, crop coefficient and decoupling factor of cowpea in the
1127 eastern Amazon. *Revista Caatinga*, v.30, n.1, p.190-200, 2017.
1128
- 1129 Fernández, F. C.; Gepts, P.; López, M. Etapas de desarrollo de la planta de frijol común
1130 (*Phaseolus vulgaris* L). Centro Internacional de Agricultura Tropical. 1986. 34 p.
1131
- 1132 Giunta, P.; Pruneddu, G.; Otzo, R. Radiation interception and biomass and nitrogen
1133 accumulation in different cereal and grain legume species. *Revista Field Crops Research*,
1134 p.76–84, 2009.
1135
- 1136 IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo agropecuário, 2017.
1137 Disponível em: <[https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-](https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=73093)
1138 [catalogo?view=detalhes&id=73093](https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=73093)>. Acesso em: 24 Jan. 2019.
1139
- 1140 Kaboosi, K.; Kaveh, F. Sensitivity analysis of Doorenbos and Kassam (1979) crop water
1141 production function. *African Journal of Agricultural Research*, v.5, n.17, p.2399-2417,
1142 2010.
1143

- 1144 Leite, M. L.; Virgens Filho, J. S. Produção de matéria seca em plantas de caupi (*Vigna*
1145 *unguiculata* (L.) Walp) submetidas a déficits hídricos. *Ciências Exatas e da Terra,*
1146 *Ciências Agrárias e Engenharias*, v.10, n.1, p.43-51, 2004.
- 1147
1148 Menezes Junior, J. A. N. de; Silva, K. J. D. e; Rocha, M. de M. Cultivo de Feijão-Caupi.
1149 Dados Sistema de Produção Versão Eletrônica 2ª edição. Mar/2017. Disponível em:
1150 <[https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1071700/1/SistemaPro](https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1071700/1/SistemaProducaoCaupiCapituloImportanciaEconomica.pdf)
1151 [ducaoCaupiCapituloImportanciaEconomica.pdf](https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1071700/1/SistemaProducaoCaupiCapituloImportanciaEconomica.pdf)>. Acesso em: 25 Set. 2018.
- 1152
1153 Merriam, J. L.; Keller, J. Farm irrigation system evaluation: a guide for management.
1154 Logan: Utah State University, p.271, 1978.
- 1155
1156 Mousinho, F. E. P.; Andrade Júnior, A. S.; FrizzonE, J. A. Viabilidade econômica do
1157 cultivo irrigado do feijão-caupi no Estado do Piauí. *Acta Scientiarum Agronomy*, v.30,
1158 p.139-145, 2008.
- 1159
1160 Moreira, W. K. O.; Oliveira, S. S.; Alves, J. D. N.; Ribeiro, R. A. R.; Oliveira, I. A.;
1161 Sousa, L. A. S. Evolução da produtividade do feijão-caupi para os principais produtores
1162 do nordeste paraense no período de 2000 à 2014. *Nucleus*, v.14, p.341-351, 2017.
- 1163
1164 Patanè, C.; Tringali, S.; Sortino, O. Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water
1165 productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate
1166 conditions. *Scientia Horticulturae*, v.129, p.590–596, 2011.
- 1167
1168 Payero, A. J. O.; Irmak, B. S. Daily energy fluxes, evapotranspiration and crop
1169 coefficientof soybean. *Agricultural Water Management*, n.129, p.31-43, 2013.
- 1170
1171 Pereira, A. R.; Angelocci, L. R.; Sentelhas, P. C. Agrometeorologia: fundamentos e
1172 aplicações práticas. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.
- 1173
1174 Pereira, A. R.; Nova, N. A. V.; Sedyama, G. C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: ESALQ,
1175 1997. 183p.
- 1176
1177 R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R
1178 Foundation for Statistical Computing, 2017. Disponível em: Acesso em: Out. 2018.
- 1179
1180 Reichardt, K.; Timm, L. C. Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações.
1181 São Paulo: Editora Manole, 2004. 478p.
- 1182
1183 SEDAP - Secretaria de Estado de Desenvolvimento Agropecuário e da Pesca. Panorama
1184 Agrícola do Pará 2010/2017 (Feijão). Disponível em:
1185 <[http://www.sedap.pa.gov.br/sites/default/files/arquivos_dados_agropecuarios/PANOR](http://www.sedap.pa.gov.br/sites/default/files/arquivos_dados_agropecuarios/PANORAMA%20AGR%20COLA%20DO%20PARA%20FEIJAO%202017_0.pdf)
1186 [AMA%20AGR%20COLA%20DO%20PARA%20FEIJAO%202017_0.pdf](http://www.sedap.pa.gov.br/sites/default/files/arquivos_dados_agropecuarios/PANORAMA%20AGR%20COLA%20DO%20PARA%20FEIJAO%202017_0.pdf)>. Acesso em: 18 Set. 2018.
- 1187
1188
1189 Souza, P. J. de O. P. de; Lima, M. J. A; Farias, V. D. da S.; Ramos, T. E.; Sousa, A. M.
1190 L. de. Biomass and leaf area production and yeld of cowpea under regimes in Castanhal,
1191 Pará. *Revista Caatinga*, v.30, p.748-759, 2017.
- 1192

- 1193 Souza, R. O. R. M.; Pantoja, A. V.; Amaral, M. A. C. M.; Neto, J. A. P. Cenário da
1194 agricultura irrigada no estado do Pará. Irriga, v.17, n.3, p.177-188, 2012.
1195
1196 van Genuchten, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity
1197 of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, v.44, p.892-
1198