

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**TERMOMETRIA POR INFRAVERMELHO COMO
INDICADOR DE ESTRESSE HÍDRICO EM PLANTAS DE
FEIJÃO-CAUPI**

ANÍSIO DA SILVA NUNES

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2012**

TERMOMETRIA POR INFRAVERMELHO COMO INDICADOR DE ESTRESSE HÍDRICO EM PLANTAS DE FEIJÃO-CAUPI

ANÍSIO DA SILVA NUNES
Engenheiro Agrônomo

Orientador: PROF. DR. LUIZ CARLOS FERREIRA DE SOUZA

Tese apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), para obtenção do título de Doutor.

Dourados
Mato Grosso do Sul
2012

**TERMOMETRIA POR INFRAVERMELHO COMO INDICADOR
DE ESTRESSE HÍDRICO EM PLANTAS DE FEIJÃO-CAUPI**

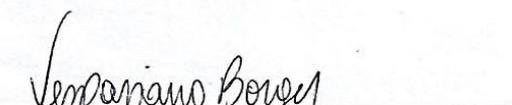
por

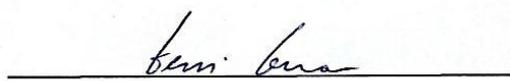
Anísio da Silva Nunes

Tese apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de
DOUTOR EM AGRONOMIA.

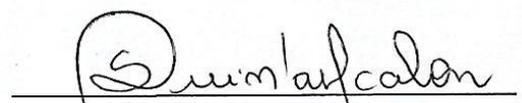
Aprovada em 07 / 12 / 2012


Prof. Dr. Luiz Carlos Ferreira de Souza
ORIENTADOR - UFGD/FCA


Prof. Dr. Vespasiano Borges de Paiva Neto
UFMS


Prof. Dr. Gessi Ceccon
Embrapa/CPAO


Prof. Dr. Etenaldo Felipe Santiago
UEMS


Profa. Dra. Silvana de Paula Quintao Scalon
UFGD/FCA

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese aos meus pais, Gabriel e Ruth, que passaram por muitas dificuldades, fizeram grandes sacrifícios e abdicaram de seus sonhos para possibilitar a realização dos meus. Também dedico esta tese à minha irmã, Teresa, que está seguindo estes mesmos caminhos acadêmicos. A eles, toda a minha gratidão e todas as minhas homenagens.

“Tenho a impressão de ser uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos”.

Isaac Newton

AGRADECIMENTOS

Esta tese foi possível graças à colaboração de algumas pessoas e instituições, às quais desejo expressar meus sinceros agradecimentos.

Ao Prof. Dr. Luiz Carlos Ferreira de Souza, pela confiança, paciência, disposição, amizade e orientação durante todo o curso de Doutorado.

Ao Prof. Dr. Gessi Ceccon, exemplo de profissional competente que não perdeu a simplicidade, por abrir as portas para mim enquanto outros as fecharam.

À Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (Fundect), pela concessão da bolsa de estudos durante o período de realização desta pesquisa; e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UFGD, pela oportunidade de realização do curso.

Aos membros da banca de defesa, Prof. Dr. Vespasiano Borges de Paiva Neto, Prof. Dr. Etenaldo Felipe Santiago e Profa. Dra. Silvana de Paula Quintão Scalon, pelas valiosas contribuições com a redação desta obra.

À minha companheira Thalise Yuri Hattori, pelo apoio, incentivo, compreensão e por corrigir todos os gerúndios do texto final.

À Maria Lucia Teles, pela paciência e pelo auxílio em todos os momentos do curso.

Ao Prof. Dr. Eduardo José de Arruda, que me apresentou a termometria por infravermelho.

Ao Adilson Brancalione, pela importante ajuda na coleta de dados.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
REVISÃO DE LITERATURA	3
1. ORIGEM E CLASSIFICAÇÃO BOTÂNICA.....	3
2. CARACTERÍSTICAS DA CULTURA.....	4
3. IMPORTÂNCIA SÓCIOECONÔMICA	5
4. EXIGÊNCIAS CLIMÁTICAS	7
5. ESTRESSE HÍDRICO	8
6. CONDUTÂNCIA ESTOMÁTICA E TEMPERATURA FOLIAR	10
7. TERMOMETRIA POR INFRAVERMELHO.....	11
8. ÍNDICE DE ESTRESSE HÍDRICO DA CULTURA.....	12
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13
CAPÍTULO I - TROCAS GASOSAS E EFICIÊNCIA FOTOSSINTÉTICA EM PLANTAS DE FEIJÃO-CAUPI SOB ESTRESSE HÍDRICO	19
1. INTRODUÇÃO	20
2. MATERIAL E MÉTODOS	21
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4. CONCLUSÕES	32
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32
CAPÍTULO II - ÍNDICE DE ESTRESSE HÍDRICO PARA A CULTURA DO FEIJÃO-CAUPI BASEADO NA TERMOMETRIA POR INFRAVERMELHO	35
1. INTRODUÇÃO	36
2. MATERIAL E MÉTODOS	37
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4. CONCLUSÕES	47
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
CAPÍTULO III - VALIDAÇÃO DE UM ÍNDICE DE ESTRESSE HÍDRICO PARA A CULTURA DO FEIJÃO-CAUPI BASEADO NA TEMOMETRIA POR INFRAVERMELHO	49
1. INTRODUÇÃO	50
2. MATERIAL E MÉTODOS	51
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4. CONCLUSÕES	58
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
CONSIDERAÇÕES FINAIS	61

TERMOMETRIA POR INFRAVERMELHO COMO INDICADOR DE ESTRESSE HÍDRICO EM PLANTAS DE FEIJÃO-CAUPI

RESUMO. Objetivou-se neste trabalho avaliar a utilização da termometria por infravermelho como indicador do estresse hídrico na cultura do feijão-caupi, a partir da diferença entre a temperatura do dossel vegetativo da cultura e a temperatura do ar. Foram realizados dois ensaios, um em condições controladas, e outro a campo, ambos em Dourados, MS, Brasil, com quatro cultivares de feijão-caupi (BRS Potengi, BRS Nova Era, BRS Guariba e BRS Itaim). O ensaio em casa de vegetação foi realizado em delineamento experimental inteiramente casualizado, com os tratamentos dispostos em um esquema fatorial 4x2, com quatro cultivares de feijão-caupi e dois status hídricos (com e sem déficit hídrico), com seis repetições. Para a simulação do déficit hídrico, realizou-se a suspensão da irrigação. Foram avaliadas a condutância estomática, a transpiração, a concentração de gás carbônico intercelular, a taxa fotossintética, a eficiência no uso da água, a temperatura foliar, a temperatura ambiente, o déficit da pressão de saturação de vapor no ar e a radiação solar global incidente. No experimento a campo, realizado em delineamento de blocos casualizados, com quatro cultivares e três repetições, além das avaliações anteriores, foi calculado o índice de estresse hídrico da cultura em um período de estiagem de quinze dias após a precipitação pluvial, com leituras aos 38, 43, 48 e 53 dias após a semeadura. De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que o déficit hídrico em plantas de feijão-caupi resulta na diminuição da condutância estomática, da transpiração, da taxa fotossintética e da concentração de carbono intercelular, com diminuição a valores próximos de zero para as três primeiras características; o fechamento estomático em plantas sob déficit hídrico é compensado pelo aumento na eficiência instantânea do uso da água; a termometria por infravermelho pode ser utilizada para estimar indiretamente a disponibilidade hídrica no solo em plantas de feijão-caupi, com base na diferença entre temperatura foliar e do ar; o modelo de índice de estresse hídrico para a cultura do feijão-caupi deve levar em consideração, além da diferença entre temperatura foliar e temperatura do ar, o déficit da pressão de saturação de vapor no ar e a radiação solar global incidente; e que a fórmula proposta para o índice de estresse hídrico da cultura do feijão caupi é válida para a aferição indireta das condições hídricas das plantas.

Palavras-chave: temperatura foliar, índice de estresse hídrico, *Vigna unguiculata*

INFRARED THERMOMETRY AS AN INDICATOR OF WATER STRESS IN COWPEA

ABSTRACT. The objective of this study was to evaluate the use of infrared thermometry as an indicator of crop water stress to cowpea, from the difference between the temperature of the crop canopy and air temperature. Two experiments were conducted, one under controlled conditions, and the other, the field, both with four cowpea cultivars (BRS Potengi, BRS Nova Era, BRS Guariba e BRS Itaim). The test in the greenhouse was held in Dourados, MS, Brazil, in a completely randomized design with treatments arranged in a 4x2 factorial design, with four cultivars of cowpea and two water status (with and without water stress), with six replicates. To simulate the drought, there was the absence of irrigation. We evaluated the stomatal conductance, transpiration, intercellular carbon dioxide concentration, photosynthetic rate, efficiency of water use, leaf temperature, ambient temperature, the deficit of saturation pressure of vapor in air and solar radiation incident. In the field experiment, besides the above variables, we calculated the index of crop water stress in a drought period of fifteen days after rainfall, with readings at 38, 43, 48 and 53 days after sowing. According to the results, it can be concluded that water deficit in cowpea plants results in decreased stomatal conductance, transpiration, photosynthetic rate and intercellular carbon concentration, with a decrease to values close to zero for first three variables; stomatal closure in plants under water deficit is offset by the increase in instantaneous efficiency of water use; infrared thermometry can be used for indirect estimation of soil water availability in cowpea plants, based on the difference between leaf temperature and air; model water stress index for growing cowpea should take into consideration, besides the difference between leaf temperature and air temperature, the deficit of the saturation pressure of vapor in air and sunlight global incident, and that the proposed formula for the index of crop water stress of cowpea is valid for indirect measurement of plant water conditions.

Keywords: leaf temperature, water stress index, *Vigna unguiculata*

INTRODUÇÃO

A agricultura é considerada uma atividade econômica de risco, em que mais de uma centena de atributos do solo, das plantas, dos sistemas de manejo e do clima afetam, direta ou indiretamente, a produtividade das culturas agrícolas. Muitos destes fatores podem ser controlados, como o ataque de pragas ou a incidência de doenças; outros, como alguns fatores climáticos, não.

As mudanças climáticas observadas ao longo dos últimos anos, com uma maior irregularidade na distribuição das precipitações pluviais, tem ocasionado períodos de estiagem em estágios cruciais do desenvolvimento das principais culturas agrícolas, resultando em prejuízos significativos aos agricultores.

Neste contexto, a compreensão dos mecanismos de tolerância das plantas aos estresses abióticos pode auxiliar na seleção de cultivares e híbridos menos sensíveis aos períodos de estiagem, na criação de indicadores do status hídrico das plantas e em técnicas de manejo mais apropriadas para as novas condições climáticas.

Entre as espécies conhecidas pela tolerância ao estresse hídrico, destaca-se o feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), uma planta originária do Centro-Oeste da África e cultivada atualmente nas regiões tropicais do planeta, como o continente africano e o semiárido nordestino brasileiro. Sua baixa exigência hídrica, quando comparada com outras culturas agrícolas, somada ao seu eficiente mecanismo de retardo da dessecação fazem desta espécie um promissor campo de estudo para a fisiologia do estresse de plantas. E embora existam muitos relatos sobre os efeitos do déficit hídrico nos estádios reprodutivos da cultura do feijão-caupi, as informações sobre suas respostas ao déficit hídrico durante o período vegetativo são incipientes, especialmente sobre a manutenção da eficiência fotossintética durante o fechamento estomático em condições de estresse hídrico.

Os indicadores do status hídrico das plantas podem ser utilizados em situações que vão desde o manejo da irrigação das culturas até a seleção de genótipos mais adaptados às condições climáticas adversas. Entretanto, grande parte destes indicadores é determinada com a utilização de equipamentos caros, por meio de técnicas muitas vezes demoradas. Nesse sentido, a utilização da termometria por infravermelho torna-se uma opção promissora, por seu baixo custo e por sua praticidade na determinação do estresse hídrico em plantas.

Diante do exposto acima, objetivou-se nesta tese defender a hipótese de que a termometria por infravermelho pode ser utilizada como indicador de estresse hídrico na cultura do feijão-caupi, a partir da diferença entre a temperatura do dossel vegetativo da cultura e a temperatura do ar. Para alcançar este objetivo geral foram traçados três objetivos específicos: i) descrever o efeito do déficit hídrico durante o estágio vegetativo sobre as trocas gasosas e a eficiência fotossintética de diferentes cultivares de feijão-caupi; ii) estimar um modelo de índice de estresse hídrico para a cultura do feijão-caupi com base na temperatura foliar, determinada com o auxílio da termometria por infravermelho, e a temperatura do ar; iii) testar o índice de estresse hídrico para a cultura do feijão-caupi em diferentes cultivares e em condições de campo.

Em relação à sua organização, a presente tese está dividida em uma revisão de literatura, na qual são descritos a origem, a importância socioeconômica, as características e o estado da arte da fisiologia do estresse em plantas de feijão-caupi; e em três capítulos, escritos na forma de artigos científicos, em que cada objetivo específico foi desenvolvido.

REVISÃO DE LITERATURA

1. ORIGEM E CLASSIFICAÇÃO BOTÂNICA

Acredita-se que o centro de origem e domesticação do feijão-caupi, também conhecido como feijão-macaçar, feijão-massar, feijão-frade ou feijão-de-corda, esteja localizado na região Centro-Oeste da África, tendo a Nigéria como provável centro primário de diversidade e a região de Transvaal, na África do Sul, como a região onde se iniciou o processo de formação de novas espécies, conforme dados obtidos em pesquisas com marcadores moleculares (FREIRE FILHO et al., 2005).

A classificação taxonômica do feijão-caupi, ao longo dos anos, mostrou-se controversa, provavelmente em virtude da grande variação genética existente. Atualmente, o feijão-caupi pertence à ordem Fabales, família Fabaceae, subfamília Faboideae, tribo *Phaseoleae*, subtribo *Phaseolinae*, gênero *Vigna*, espécie *Vigna unguiculata* (L.) Walp. (ONOFRE, 2008). O gênero *Vigna*, comporta, ao todo, sete espécies domesticadas, cinco delas de origem asiática e duas de origem africana. As espécies de origem asiática são o feijão-da-china (*Vigna radiata* (L.) Wilczek), feijão-da-índia (*Vigna mungo* (L.) Hepper), feijão-jugo (*Vigna aconitifolia* (Jacq.) Maréchal), feijão-azuqui (*Vigna angularis* (Willd.) Ohwi et Ohashi) e o feijão-arroz (*Vigna umbellata* (Thunb.) Ohwi et Ohashi). As pertencentes ao grupo africano são o feijão-bambara (*Vigna subterranea* (L.) Verdc.) e o feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) (BA et al., 2004).

A introdução do feijão-caupi no Brasil ocorreu pelo estado da Bahia, a partir do qual foi levado pelos colonizadores para outras áreas da região Nordeste e para outras regiões do país (WATT, 1978). Entretanto, é possível que durante a migração de africanos, no período da escravidão, outros eventos de introdução tenham ocorrido no país (SIMON et al., 2007). Embora o uso do feijão-caupi seja muito semelhante ao do feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.), sua predominância é observada nos trópicos semiáridos, úmido e subúmido, em condições climáticas às quais se apresenta melhor adaptado (SMARTT, 1990).

2. CARACTERÍSTICAS DA CULTURA

O feijão-caupi é uma planta anual, herbácea, multiplicada por sementes, que apresenta autofecundação e uma taxa muito baixa de fecundação cruzada (TEÓFILO et al., 1999). Suas flores, completas, têm os órgãos masculinos e femininos bem protegidos pelas pétalas, em número de cinco, de coloração branca, amarela ou violeta (TEÓFILO et al., 2001). Apresenta dois tipos de hábitos de crescimento principais, sendo eles o determinado e o indeterminado. No hábito de crescimento determinado, o caule produz um número limitado de nós e cessa seu crescimento com a emissão da primeira inflorescência. Nas plantas de crescimento indeterminado, o caule continua a crescer após a emissão da primeira inflorescência, emitindo novos ramos secundários e gemas florais. Este tipo é o mais comumente cultivado no Brasil (ARAÚJO et al., 1981).

Quanto ao porte, as plantas de feijão-caupi são divididas em porte ereto, semiereto, semiprostrado e prostrado (FREIRE FILHO et al., 2005). Cultivares de porte ereto ou semiereto possibilitam a colheita mecanizada, enquanto as cultivares semiprostradas ou prostradas são colhidas manualmente ou parcialmente mecanizadas.

Devido à grande variabilidade genética de seus caracteres, especialmente em relação ao porte e hábito de crescimento, poucas informações são encontradas em relação às suas fases de desenvolvimento, apesar de ser uma espécie relativamente bem estudada (CAMPOS et al., 2000). Em uma das poucas escalas fenológicas descritas para a cultura do feijão-caupi, o ciclo de vida da planta é dividida da seguinte forma (MAFRA, 1979): **Fase vegetativa:** V0 – Semeadura; V1 – os cotilédones encontram-se emergidos na superfície do solo; V2 – as folhas unifolioladas estão completamente abertas, suas duas margens estão completamente separadas; V3 – a primeira folha trifoliolada está com os folíolos separados e completamente abertos; V4 - a segunda folha trifoliolada encontra-se com os folíolos separados e completamente abertos; V5 - a terceira folha trifoliolada está com os folíolos separados e completamente abertos; V6 – os primórdios do ramo secundário surgem nas axilas das folhas unifolioladas, podendo também ser observados nas axilas das primeiras folhas trifolioladas; V7 – primeira folha do ramo secundário completamente aberta; V8 – a segunda folha do ramo secundário encontra-se completamente aberta; V9 – terceira folha do ramo secundário completamente

aberta. **Fase reprodutiva:** R1 – surgem os primórdios do primeiro botão floral no ramo principal; R2 – antese da primeira flor, geralmente oriunda do primeiro botão floral; R3 – início da maturidade da primeira vagem, geralmente oriunda da primeira flor. Esse estágio é caracterizado pelo início da mudança de coloração das vagens devido ao início da secagem das mesmas; R4 – maturidade de 50% das vagens da planta; e R5 – maturidade de 90% das vagens da planta.

O tempo de duração entre os diferentes estádios de desenvolvimento da planta pode variar de acordo com a cultivar, a temperatura, o clima e a época de semeadura, entre outros fatores (CÂMARA, 1997). Além disso, é possível observar um comportamento diferenciado dos genótipos de feijão-caupi nos sistemas de cultivo de sequeiro e irrigado, na fase vegetativa (V3, V4, V7, V8 e V9) e reprodutiva (R2 e R5) (MAFRA, 1979).

A duração do ciclo de vida das plantas de feijão-caupi pode ser classificada como de ciclo superprecoce - quando a maturidade é atingida até 60 dias após a semeadura; ciclo precoce - quando a maturidade é atingida entre 61 e 70 dias após a semeadura; ciclo médio - quando a maturidade é atingida entre 71 e 90 dias após a semeadura; e ciclo tardio - a maturidade é atingida após 91 dias da semeadura (FREIRE FILHO, 2000).

Em relação à atividade fotossintética, o feijão-caupi é classificado como uma planta do tipo C₃, ou seja, possui apenas o mecanismo de carboxilação chamado de processo redutivo da pentose fosfato (ciclo de Calvin ou ciclo de Benso-Calvin). Por meio desse mecanismo a planta de feijão-caupi fixa o CO₂ atmosférico metabolizando-o em compostos orgânicos que vão compor a estrutura da planta, formada em mais de 90% por compostos de carbono e em menos de 10% por elementos minerais. Sendo uma planta C₃, o feijão-caupi satura-se fotossinteticamente a intensidades de luz relativamente baixas, isto é, entre de 10.000 e 40.000 lux (CARDOSO et al., 2000).

3. IMPORTÂNCIA SÓCIOECONÔMICA

O feijão-caupi é cultivado em vários países, em uma área superior a 12 milhões de hectares, e pode ser encontrado em todas as regiões de clima tropical (VIJAYKUMAR et al., 2010). Sua produção é especialmente importante na Índia e

em todo o continente africano, onde assume grande relevância socioeconômica, assim como em alguns locais de clima temperado, como no vale da Califórnia e na bacia do Mediterrâneo, e em vários países em desenvolvimento (XAVIER et al., 2005).

Entre os maiores produtores mundiais de feijão-caupi, destacam-se a Nigéria, com uma produção anual aproximada de 1,2 milhões de toneladas, o Níger, com pouco mais de um milhão de toneladas, e o Brasil, com cerca de 820 mil toneladas (IBGE, 2011; FAO, 2012). Entre os estados brasileiros, Ceará, Piauí e Pernambuco são os maiores produtores do grão e as regiões Norte e Nordeste do país detêm o maior consumo *per capita* de feijão-caupi, especialmente na zona rural, variando de 9,2 a 21,8 kg pessoa⁻¹ ano⁻¹, de acordo com o Estado. A média nestas regiões é 15 kg pessoa⁻¹ ano⁻¹ (FREIRE FILHO, 2011).

Apesar de não ser o maior produtor mundial, o Brasil apresenta uma produtividade média superior aos demais, com 320 kg ha⁻¹, enquanto na Nigéria e no Níger as produtividades encontradas são de, respectivamente, 260 kg ha⁻¹ e 211 kg ha⁻¹ (FAO, 2012). Em alguns estados brasileiros, como Goiás, Amazonas e Mato Grosso do Sul, são observadas produtividades superiores a 1.000 kg ha⁻¹ (IBGE, 2011). Em condições experimentais, foram obtidas no Brasil produtividades acima de 3.000 kg ha⁻¹ (BEZERRA, 1997), entretanto, a expectativa é que seu potencial genético ultrapasse 6.000 kg ha⁻¹ (FREIRE FILHO et al., 2005).

O baixo rendimento médio da cultura, em vista de seu potencial genético, pode ser explicado principalmente pela baixa utilização de tecnologias adequadas nas lavouras de subsistência, que representam uma parcela significativa da produção de feijão-caupi (FAO, 2012). Em cultivos comerciais, as baixas produtividades são decorrentes de erros no manejo de pragas, doenças e plantas daninhas, irregularidades das chuvas ou suprimento inadequado de água no cultivo irrigado, utilização de variedades não melhoradas e sementes de baixa qualidade, associados à falta de informação dos agricultores (OLIVEIRA et al., 2003). A perspectiva, entretanto, é de aumento na utilização de tecnologias adequadas, com a modernização e a mecanização de todas as etapas de cultivo (MATOS FILHO et al., 2009).

Além de ser uma excelente fonte de proteínas (23-25% em média), carboidratos (62%, em média), vitaminas e minerais, o feijão-caupi possui grande quantidade de fibras dietéticas e baixa quantidade de gordura (teor de óleo de 2%, em

média) (FROTA et al., 2008). O consumo do feijão-caupi pode ser realizado na forma de vagens verdes, colhidas quando estão bem desenvolvidas, mas ainda com baixo teor de fibras; na forma de grãos verdes, colhidos no início da maturação; e como grão seco, em que as vagens são colhidas secas (VIEIRA et al., 2000).

A farinha integral pré-cozida produzida a partir do feijão-caupi pode ser utilizada na alimentação de crianças menores de cinco anos como ingrediente de papas, mingaus e caldos, bem como na alimentação escolar, enriquecendo com proteínas massas alimentícias como pães, biscoitos, bolachas e macarrão (SILVA, 2002). Por esse motivo, o feijão-caupi é utilizado em programas de combate à desnutrição infantil no Brasil e em países como Índia, Angola, Moçambique e África do Sul (MARTINS et al., 2003).

4. EXIGÊNCIAS CLIMÁTICAS

Embora o feijão-caupi seja geralmente cultivado em regiões áridas ou semiáridas, sua capacidade de adaptação às condições ambientais possui variações dentro da espécie, em função de sua elevada diversidade genética (SUMMERFIELD et al., 1985). A exigência hídrica do feijão-caupi para a obtenção de altas produtividades é de 300 a 400 mm durante todo o seu ciclo (DOORENBOS e KASSAM, 2000), inferior à maioria das espécies anuais cultivadas.

O requerimento de água, entretanto, não é constante em todos os estádios de desenvolvimento, aumenta de um valor mínimo na germinação até um valor máximo na floração e na formação das vagens, que decresce a partir do início da maturação (NÓBREGA et al., 2001). O consumo hídrico diário para a cultura no período inicial varia entre 5,0 a 7,0 mm, chegando a 9 mm dia⁻¹ quando a planta alcança o desenvolvimento vegetativo pleno (ANDRADE et al., 1993; CARDOSO et al., 1998).

O desenvolvimento adequado da cultura do feijão-caupi ocorre na faixa de temperatura entre 18 a 34°C. A temperatura base, abaixo da qual o crescimento cessa, é diferente para cada estágio fenológico. Para a germinação, a temperatura basal pode variar entre 8 e 11°C (CRAUFURD et al., 1996a), enquanto para o estágio de florescimento, entre 8 e 10°C (CRAUFURD et al., 1996b). Temperaturas superiores a 35°C acarretam prejuízos à cultura, como aborto espontâneo das flores, retenção

das vagens na planta, diminuição significativa do número de sementes por vagem e, conseqüentemente, redução da produtividade (CAMPOS et al., 2010).

Temperaturas extremas, baixas ou elevadas, podem afetar diferentes processos metabólicos dos organismos vegetais, incluindo a fotossíntese, a respiração, as relações hídricas, a fluidez e a estabilidade dos sistemas de membranas, além de modular os níveis de hormônios e de metabólicos primário e secundário (WAHID et al., 2007).

Em geral, as plantas exibem diferentes respostas às variações de temperatura do ambiente em que se encontram. Algumas dessas respostas são rápidas, enquanto outras necessitam de estímulos cumulativos de temperatura, que variam desde dias até semanas. Além disto, o calor pode causar incremento de biomassa e aumento na taxa de transpiração, que atua como mecanismo fisiológico de dissipação de calor, atenuando o aquecimento foliar (RIZHSKY et al., 2002).

A temperatura exerce ainda influência sobre a suscetibilidade de plantas a doenças. A influência da temperatura sobre o desenvolvimento de uma doença está diretamente relacionada com a interação entre patógeno e hospedeiro. O desenvolvimento mais rápido de uma doença, ou seja, um período mais curto de tempo para a conclusão de um ciclo de infecção, geralmente ocorre em temperaturas ótimas para o desenvolvimento do patógeno e acima ou abaixo das ideais para o desenvolvimento do hospedeiro (LIDDELL, 1997).

5. ESTRESSE HÍDRICO

O estresse pode ser definido como um fator externo que exerce influência desvantajosa sobre a planta e que induz mudanças e respostas em todos os níveis funcionais do organismo (TAIZ e ZEIGER, 2009). Em condições naturais e agricultáveis, as plantas estão frequentemente expostas ao estresse ambiental, responsável por reduções no rendimento das lavouras comerciais, além de restringir latitudes e solos onde espécies comercialmente importantes podem ser cultivadas (NEPOMUCENO et al., 2001).

Em função da importância da água para o crescimento das plantas, o estresse hídrico, por déficit ou excesso, ocupa posição de destaque nos estudos sobre os estresses ambientais. Entende-se por déficit hídrico todo conteúdo de água de um

tecido ou célula que esteja abaixo do conteúdo mais alto exibido no estado de maior hidratação (TAIZ e ZEIGER, 2009). As respostas das plantas ao déficit hídrico podem ser divididas entre retardo da desidratação, que corresponde à capacidade da planta em manter a hidratação de seus tecidos; tolerância à desidratação, que é a capacidade da planta em manter seu metabolismo enquanto desidratada; e o escape da seca, que engloba as espécies que completam seu ciclo durante a estação úmida, antes do início da seca (NASCIMENTO et al., 2011).

A adaptação à falta de água é considerada uma característica multigênica, e existem diferenças na tolerância ao déficit hídrico entre genótipos de feijão-caupi (ISMAIL et al., 1994). Os principais mecanismos morfológicos e fisiológicos de adaptação no feijão-caupi são o desenvolvimento do sistema radicular e alta condutividade hidráulica das raízes, para 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). Entre estes mecanismos para minimizar as perdas de água, o controle do fechamento estomático parece ser uma característica herdável, sob controle de genes nucleares (JONES, 1998). Porém, apesar de permitir uma maior conservação de água, o fechamento dos estômatos causa redução da assimilação de CO₂, e, conseqüentemente, diminuição da produtividade (PLAUT, 1994).

As respostas dos vegetais à deficiência hídrica incluem muitas vezes alterações bioquímicas em nível celular (FLOSS, 2004). O acúmulo intracelular de solutos osmoticamente ativos em resposta às condições estressantes de baixa disponibilidade de água é um importante mecanismo desenvolvido pelas plantas (NEPOMUCENO et al., 2001). Este mecanismo, denominado ajuste osmótico, tem sido verificado em várias espécies, sendo considerado um dos mais eficazes para manutenção da turgescência celular, permitindo principalmente a manutenção da abertura estomática e da fotossíntese sob condições de baixo potencial hídrico no solo (KRAMER, 1983).

Entre os mecanismos de ajuste osmótico, o acúmulo de prolina nas células de plantas expostas ao estresse hídrico é seguramente o mais bem estudado. A prolina é um aminoácido que atua não só no ajuste do potencial osmótico, mas também como estabilizador de estruturas subcelulares e redutor de radicais livres (HARE e CRESS, 1997). Plantas de feijão-caupi submetidas ao déficit hídrico podem apresentar

incremento de 40 a 70% no teor de prolina após o nono dia de suspensão hídrica, com respostas diferentes de acordo com as cultivares (COSTA et al., 2006).

O déficit hídrico em plantas de feijão-caupi pode ainda aumentar a produção de enzimas hidrolíticas, como a protease, ocasionando a queda do teor de proteínas solúveis nas folhas (COSTA et al., 2006), ou de enzimas como a catalase, envolvidas com o estresse oxidativo (SOUZA et al., 2012).

6. CONDUTÂNCIA ESTOMÁTICA E TEMPERATURA FOLIAR

Ao absorverem CO₂, as plantas de feijão-caupi inevitavelmente perdem água pelas folhas. Essa perda de água ocorre principalmente por meio dos estômatos, que possuem os mecanismos de controle das trocas gasosas. Esse controle é atribuído à condutância estomática foliar, que é frequentemente utilizada como indicador de déficit hídrico (McDERMIT, 1990). Portanto, o controle da abertura estomática é considerado uma importante propriedade fisiológica, por meio da qual as plantas limitam a perda de água reduzindo as trocas gasosas como forma de resposta das plantas ao estresse hídrico (PAIVA et al., 2005).

A redução da condutância estomática pode ocorrer não só em resposta aos baixos valores de potencial hídrico do solo, como também aos baixos índices de radiação solar e aos altos valores de déficit de pressão de vapor (MILLAR, 1972). Desta forma, os modelos utilizados para explicar o controle da condutância estomática levam em consideração as condições hídricas do solo, a radiação global ou fotossinteticamente ativa, a temperatura do ar e o déficit de pressão de vapor atmosférico (JARVIS, 1976). Cada um destes elementos apresenta influência independente no funcionamento estomático; porém, o efeito individual resultante de cada elemento no aparelho estomático é multiplicativo (TAIZ e ZEIGER, 2009).

Assim, a resistência estomática apresenta estreita relação com a temperatura da folha e a transpiração. A diferença de temperatura foliar em plantas com e sem estresse se fundamenta no estado hídrico das plantas, no comportamento estomático e na perda de calor latente por meio da transpiração. Entretanto, todo esse processo pode variar conforme a intensidade e duração do estresse hídrico (OLIVEIRA et al., 2005). A manutenção da temperatura foliar igual ou ligeiramente inferior à temperatura do ar comprova a capacidade de refrigeração das diversas cultivares ou

espécies, via transpiração, com o objetivo de proteger as plantas contra estresses térmicos. Esse é um comportamento desejável e também foi observado em outras espécies vegetais (LUDLOW e MUCHOW, 1990).

A temperatura foliar, a relação entre temperatura foliar e a temperatura do ar ou mesmo a diferença entre ambas, têm sido empregadas por diversos pesquisadores como indicadores das condições hídricas das plantas (SUBBARAO et al., 1995, GUIMALHÃES, 2005; MENDES et al., 2007). Nestas pesquisas, a temperatura do dossel se correlaciona significativamente com o potencial de água nas folhas e sua medição, por ser rápida e não destrutiva, apresenta-se como uma técnica útil no processo de seleção de genótipos de feijão-caupi para regiões sujeitas ao déficit hídrico. Desta forma, sob condições de déficit hídrico, a temperatura foliar se apresenta, comumente, mais elevada que a temperatura do ar, resultando em aumento na relação temperatura foliar/ambiente (MENDES et al., 2007).

7. TERMOMETRIA POR INFRAVERMELHO

Termômetros a infravermelho são radiômetros que medem a energia na faixa do infravermelho, e são utilizados para estimar a temperatura nesta faixa de radiação (CAMPBELL e NORMAN, 1998). Quando a temperatura de uma folha exposta à radiação solar se eleva, a energia infravermelha que esta emite também aumenta. Como a emissividade da radiação infravermelha das plantas verdes é alta (0,95 a 0,98), a medida da temperatura radiativa pode ser convertida na temperatura da planta, com um pequeno erro, por meio da lei de Stefan-Boltzman (SANMARTIN e ACEVEDO, 2001).

O desenvolvimento de termômetros a infravermelho portáteis e de baixo custo, no início dos anos 70, permitiu o aumento das pesquisas sobre o uso de sensores remotos para a medição da temperatura do dossel vegetativo e sobre a detecção de ocorrência de estresse hídrico (GARCIA et al., 2000). Entre as vantagens da termometria por infravermelho estão a relativa facilidade de uso, a rapidez nas medições e o fato de ser um método não destrutivo (KIRKHAN, 2004).

Para a determinação da temperatura do dossel com termômetros a infravermelho alguns procedimentos devem ser observados, como a limpeza da lente do sensor a infravermelho, a calibração regular, a escolha correta da emissividade do

objeto e o posicionamento do sensor em relação à superfície a ser medida (GARDNER et al., 1992)

8. ÍNDICE DE ESTRESSE HÍDRICO DA CULTURA

A temperatura do dossel é influenciada pela temperatura do ar, pela intensidade de radiação, pelo conteúdo de água na folha e pela velocidade do ar, assim como pelas dimensões e ângulo de orientação das folhas em relação à radiação solar incidente, troca de calor sensível e pelo gradiente de pressão de saturação de vapor no ar (EHRLER, 1973).

Entre os índices criados para a avaliação do estresse hídrico em plantas com base na temperatura foliar, destaca-se o índice de estresse hídrico da cultura (IDSO et al., 1981), uma abordagem empírica que utiliza apenas três variáveis: a temperatura foliar, a temperatura do ar e o déficit de pressão de saturação de vapor no ar. O índice de estresse hídrico da cultura é calculado pela diferença entre a temperatura do dossel e do ambiente, comparada com esta diferença em condições de déficit hídrico severo e de ausência de limitação de água, denominados, respectivamente, linha base superior e linha base inferior (JACKSON et al., 1981), por meio da seguinte fórmula:

$$IEHC = \frac{(t_c - t_a) - (t_c - t_a)_{LBI}}{(t_c - t_a)_{LBS} - (t_c - t_a)_{LBI}}$$

em que: IEHC significa índice de estresse hídrico da cultura; $t_c - t_a$ é a diferença de temperatura entre a folha e o ar (°C); $(t_c - t_a)_{LBI}$ é a linha base inferior, obtida na ausência de estresse hídrico; $(t_c - t_a)_{LBS}$ é a linha base superior, obtida em condições de estresse hídrico severo.

Desta forma, o limite superior experimental representa o estresse hídrico máximo tolerado pela cultura, sendo definido quando os estômatos estariam completamente fechados. A posição da linha de estresse hídrico máximo pode ser determinada experimentalmente quando a umidade no solo esta próxima do ponto de murcha permanente. Assim, segundo os limites experimentais, o índice de estresse hídrico para a cultura estará compreendido entre 0 (estresse nulo) e 1 (estresse máximo) (TRENTIN, 2010).

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, C.L.T.; SILVA, A.A.G.; SOUZA, I.R.P.; CONCEIÇÃO, M.A. F. **Coefficientes de cultivo e de irrigação para o caupi**. Parnaíba: EMBRAPA-CNPAP, 1993. 6p. (EMBRAPA-CNPAP. Comunicado Técnico, 9).

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 no Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, v.12, n.1/2, p.187-193, 1981.

BA, F. S.; PASQUET, R. S.; GEPTS, P. Genetic diversity in cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] as revealed by RAPD markers. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v.51, n.5, p.539-550, 2004.

BEZERRA, A.A. de C. **Variabilidade e diversidade genética em caupi (*Vigna unguiculata* (L) Walp.) precoce, de crescimento determinado e porte ereto e semi-ereto**. 1997. 105f. Dissertação (Mestrado em Botânica - Melhoramento Genético de Plantas) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 1997.

CÂMARA, G.M.S. Como a planta de soja se desenvolve. **Arquivo do Agrônomo**, n.11, p.1-21, 1997.

CAMPBELL, G.S.; NORMAN, J.M. **Introduction to environmental biophysics**. New York: Springer, 1998. 286p.

CAMPOS, F.L.; FREIRE FILHO, F.R.; LOPES, A.C. de A.; RIBEIRO, V.Q.; SILVA, R.Q.B. da; ROCHA, de M.R. Ciclo fenológico em caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.): uma proposta de escala de desenvolvimento. **Revista Científica Rural**, v.5, n.2, p.110-116, 2000.

CAMPOS, J.H.B.C.; MADSON, T.S.; SILVA, V.P.R. Impacto do aquecimento global no cultivo do feijão-caupi, no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.4, p.396-404, 2010.

CARDOSO, M.J.; MELO, F. de B.; ANDRADE JÚNIOR, A.S. de; ATHAYDE SOBRINHO, A.; RODRIGUES, B.H.N. Níveis de fósforo, densidades de plantas e eficiência de utilização da água em caupi de portes ramador e moita em areia quartzosa. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DE SOLO E ÁGUA, XII., 1998, Fortaleza. **Resumos Expandidos...** Fortaleza:UFC, 1998. p.146.

CARDOSO, M.J.; MELO, F. de 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, 2000. p.49-88.

COSTA, R.C.L; LOBATO, A.K.S.; OLIVEIRA NETO, C.F. Níveis de prolina em folhas de feijão-caupi submetidas ao déficit hídrico. In: Congresso Nacional de

Feijão-Caupi: Tecnologias para o agronegócio. **Anais...** Feijão-Caupi, VI Reunião Nacional de Feijão-Caupi, Teresina, 2006.

CRAUFURD, P.Q.; ELLIS, R.H.; SUMMERFIELD, R.J.; MENIN, L. Development in cowpea (*Vigna unguiculata*) I. The influence of temperature on seed germination and seedling emergence. **Experimental Agriculture**, v.32, p.1-12, 1996a.

CRAUFURD, P.Q.; SUMMERFIELD, R.J.; ELLIS, R.H.; ROBERTS, E.H. Development in cowpea (*Vigna unguiculata*). III. Effect of temperature and photoperiod on time flowering in photoperiod-sensitive genotypes and screening for photothermal responses. **Experimental Agriculture**, v.32, n.1, p.29-40, 1996b.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. 2.ed. Campina Grande: UFPB, 2000. 221p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

EHRLER, W.L.; VAN BAVEL, C.H.M. Cotton leaf temperatures as related to soil water depletion and meteorological factors. **Agronomy Journal**, v.65, p.404-409, 1973.

FAO. FAOSTAT. **Crops. Cow peas, dry**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>>. Acesso em 10 ago. 2012.

FLOSS, E.L. **Fisiologia das plantas cultivadas: o estudo que está por trás do que se vê**. Passo Fundo: UPF, 2004, 528p.

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

FREIRE FILHO, F.R.; RIBEIRO, V.Q.; BARRETO, P.D.; SANTOS, A.A. dos. Cultivares de caupi para a região Meio-Norte do Brasil. In: CARDOSO, M. J. (Org.). **A cultura do feijão-caupi no Meio-Norte do Brasil**. Teresina: Embrapa-CPAMN, 2000. p.67-68 (Embrapa-CPAMN, Circular Técnica)

FREIRE FILHO, F.R.; RIBEIRO, V.Q.; BARRETO, P.D.; SANTOS, A.A. dos. Melhoramento genético. In: **Feijão-caupi: avanços tecnológicos**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. p.29-92.

FROTA, K.D.M.G.; SOARES, R.A. M.; AREAS, J.A.G. Composição química do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp), cultivar BRS-Milênio. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.28, p.470-476, 2008.

GARCIA, A.; ANDRE, R.G.B.; FERREIRA, M.I.; PAÇO, T. Comparação de modelos para avaliação do estresse hídrico em cultura de nectarinas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.8, n.1, p.43-48, 2000.

GARDNER, B.R.; NIELSEN, D.C.; SHOCK, C.C. Infrared thermometry and the crop water stress index: II. Sampling procedures and interpretation. **Journal Production Agriculture**, v.5, p.466-475, 1992.

GUIMARÃES, F.V. **Respostas fisiológicas e bioquímicas em plantas de feijão de corda cv Pitiúba submetidas ao estresse com NaCl em diferentes concentrações de CaCl₂ e CaSO₄**. 2005. 176f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

HARE, P.D.; CRESS, W.A. Metabolic implications of stress-induced proline accumulation in plants. **Plants Growth Regulation**, v.21, p.79-102, 1997.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Rio de Janeiro: IBGE, v.16-20, 2011.

IDSO, S.B.; JACKSON, R.D.; PINTER JUNIOR, P.J.; REGINATO, R.J.; HATFIELD, J.L. Normalizing the stress degree day parameter for environmental variability. **Agricultural Meteorology**, v.24, p.45-55, 1981.

ISMAIL, A.M.; HALL, A.E.; BRAY, E.A. Drought and pot size effects on transpiration efficiency and carbon isotope discrimination of a cowpea accessions and hybrids. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.21, n.1, p.23-35, 1994.

JACKSON, R.D.; IDSO, S.B.; REGINATO, R.J.; PINTER JUNIOR, R.J. Canopy temperature as crop water stress indicator. **Water Resources Research**, v.17, p.1133-1138, 1981.

JARVIS, P.G. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. **Philosophical Transactions of the Royal Society: Biological Sciences**, v.273, n.2, p. 593-610, 1976.

JONES, H.G. Stomatal control of photosynthesis and transpiration. **Journal of Experimental Botany**, v.49, n.1, p.387-398, 1998.

KIRKHAN, M.B. **Principles of soil and water plant relations**. Elsevier Academic Press, 2004. 500p.

KRAMER, P.J., **Water Relations of Plants**. New York: Academic Press, 1983. P. 404-406.

LIDDELL, C.M. Abiotic factors and soilborne diseases. In: HILLOCKS, R.J.; WALLER, J.M. (Eds.) **Soilborne Diseases of Tropical Crops**. Wallingford: CAB International. 1997. p.365-376.

LUDLOW, M.M.; MUCHOW, R.C. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water limited environments. **Advances in Agronomy**, v.43, n.1, p.107-153, 1990.

MAFRA, R.C. Contribuição ao estudo da cultura macassar, fisiologia, ecologia e tecnologia da produção. In: **Curso de treinamentos para pesquisadores de Caupi**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAF, 1979. 39 p.

MARTINS, L.M.V.; XAVIER, G.R.; RANGEL, F.W. Contribution of biological nitrogen fixation to cowpea: a strategy for improving grain yield in the semi-arid region of Brazil. **Biology and Fertility of Soils**, v.38, n.2, p.333-339, 2003.

MATOS FILHO, C.H.A.; GOMES, R.L.F.; ROCHA, M.R.; FREIRE FILHO, F.R.; LOPES, A.C.A. Potencial produtivo de progênies de feijão-caupi com arquitetura ereta de planta. **Ciência Rural**, v.39, n.2, p.348-354, 2009.

McDERMIT, D.K. Sources of error in the estimation of stomatal conductance and transpiration from porometer data. **HortScience**, v.25, n.12, p.1538-48, 1990.

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.

MILLAR, A.A. Thermal regime of grapevines. **American Journal of Enology and Viticulture**, v.23, n.4, p.173-6, 1972.

NASCIMENTO, S.P.; BASTOS, E.A.; ARAUJO, E.C.E.; FREIRE FILHO, F.R.; EVERALDO, M.S. Tolerância ao déficit hídrico em genótipos de feijão-caupi. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.8, p.853-860, 2011.

NEPOMUCENO, A.L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J.R.B.; OYA, T. Tolerância à seca em plantas: Mecanismos fisiológicos e moleculares. **Revista Biotecnologia, Ciência & Desenvolvimento**, n.23, p.12-18, 2001.

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**, v.5, n.3, p.437-443, 2001.

OLIVEIRA, A.D.; FERNANDES, J.E.; RODRIGUES, T.J.D. Condutância estomática como indicador de estresse hídrico em feijão. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.1, p.86-95, 2005.

OLIVEIRA, A.P.; SILVA, V.R.F.; ARRUDA, F.P. de; NASCIMENTO, I.S. do; ALVES, A.U. Rendimento de feijão-caupi em função de doses e formas de aplicação de nitrogênio. **Horticultura Brasileira**, v.21, n.1, p.77-80, 2003.

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**. 2008. Dissertação (Mestrado em Botânica - Melhoramento Genético de Plantas) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2008.

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

PLAUT, Z., Photosynthesis in plant/crops under water and salt stress. In: PESSARAKLI, M. (Ed.) **Handbook of plant and crop stress**. New York: Marcel Dekker, 1994. p.587-603.

RIZHSKY, L.; LIANG, H.; MITTLER, R.; The combined effect of drought stress and heat. Shock on gene expression in tobacco. **Plant Physiology**, v.130, p.1143-1151, 2002.

SANMARTIN, J.P.; ACEVEDO, E. **Temperatura de canopia, CWSI e rendimento en genótipos de trigo**. 2001. 58 p. Laboratorio de Relación Suelo-Água-Planta. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile.

SILVA, S.M.S.; MAIA, J.M.; ARAÚJO, Z.B.; FREIRE FILHO, F.R. **Composição química de 45 genótipos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp)**. Teresina: EMBRAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2002. 2 p. (Comunicado Técnico, 149).

SIMON, M.V.; BENKO-ISEPPON, A.M.; RESENDE, L.V.; WINTER, P.; KAHL, G. Genetic diversity and phylogenetic relationships in *Vigna Savi* germplasm revealed by DNA amplification fingerprinting (DAF). **Genome**, v.50, n.1, p.538-547, 2007.

SMARTT, J. Evolution of genetic resources. In: SMARTT, J. (Ed.), **Grain Legumes**. Cambridge: Cambridge University Press, p.140-175, 1990.

SOUZA, C.C.M.; OLIVEIRA FILHO, R.A.; DAVID, M.F.; PEDROSA, E.M.R.; PEREIRA FILHO, J.V. Respostas fisiológicas do feijão-caupi submetido a nematóides e estresse hídrico em casa de vegetação. In: IV WORKSHOP INTERNACIONAL DE INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA IRRIGAÇÃO. **Anais...** Fortaleza, 2012.

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**, v.14, p.469-529, 1995.

SUMMERFIELD, R.J.; PATE, J.S.; ROBERTS, E.H.; WIEN, H.C. The physiology cowpea. In: SINGH, S.R.; RACHIE, K. O. (Eds.). **Cowpea research, production and utilization**. Chichester: John Wiley, 1985. p.66-101.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto. Alegre: Artmed, 2009. 819p.

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

TEÓFILO, E.M.; PAIVA, J.B.; MEDEIROS FILHO, S. Polinização artificial em feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **Ciência e Agrotecnologia**, v.25 n.1, p.220-223, 2001.

TRENTIN, R. **Estimativa de um índice de estresse hídrico para a cultura da cana-de-açúcar com base na temperatura foliar**. 2010. 61f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

VIEIRA, R.F.; VIEIRA, C.; CALDAS, M.T. Comportamento do feijão-fradinho na primavera-verão na zona da mata de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.7, p.1359-1365, 2000.

VIJAYKUMAR, A.; SAINI, A.; JAWALI, N. Phylogenetic Analysis of Subgenus *Vigna* Species Using Nuclear Ribosomal RNA ITS: Evidence of Hybridization among *Vigna unguiculata* Subspecies. **Journal of Heredity**, v.101, n.2, p.177-188, 2010.

WAHID, A.; GELANI, S.; ASHRAF, M ; FOOLAD, M.R. Heat tolerance in plants: An overview. **Environmental and Experimental Botany**, v.61, p.199-223. 2007.

WATT, E.E. **First annual report on the EMBRAPA/IITA - Cowpea Program in Brazil**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAF, 1978. 55p.

XAVIER, G.R.; MARTINS, L.M.V.; RUMJANEK, N.G.; FREIRE FILHO, F.R. Variabilidade genética em acessos de caupi analisada por meio de marcadores RAPD. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, n.4, p.353-359, 2005.

CAPÍTULO I - TROCAS GASOSAS E EFICIÊNCIA FOTOSSINTÉTICA EM PLANTAS DE FEIJÃO-CAUPI SOB ESTRESSE HÍDRICO

RESUMO. Objetivou-se neste trabalho avaliar o efeito do déficit hídrico durante o estágio vegetativo sobre as trocas gasosas e a eficiência fotossintética de diferentes cultivares de feijão-caupi. O experimento foi realizado em Dourados, MS, Brasil, em casa de vegetação. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com os tratamentos dispostos em um esquema fatorial 4x2, com quatro cultivares de feijão-caupi (BRS Potengi, BRS Nova Era, BRS Guariba e BRS Itaim) e dois status hídricos (com e sem déficit hídrico), com seis repetições. Para a simulação do déficit hídrico realizou-se a suspensão da irrigação. Foram avaliadas a condutância estomática, a transpiração, a concentração de gás carbônico intercelular, a taxa fotossintética e a eficiência no uso da água, por meio de um analisador de gases no infravermelho. Concluiu-se que o déficit hídrico em plantas de feijão-caupi resulta na diminuição da condutância estomática, da transpiração, da taxa fotossintética e da concentração de carbono intercelular, diminuindo a valores próximos de zero para as três primeiras características; e que as cultivares BRS Potengi e BRS Itaim possuem, respectivamente, a maior e a menor adaptação às condições de déficit hídrico entre as cultivares estudadas.

Palavras-chave: condutância estomática, transpiração, carbono intercelular, *Vigna unguiculata*

GAS EXCHANGE AND PHOTOSYNTHETIC EFFICIENCY IN COWPEA PLANTS UNDER WATER STRESS

ABSTRACT. The objective of this study was to evaluate the effect of water stress during the vegetative stage on gas exchange and photosynthetic efficiency of different cultivars of cowpea. The experiment was conducted in Dourados, MS, Brazil, in a greenhouse. The experimental design was a completely randomized design with treatments in a 4x2 factorial design, with four cowpea cultivars (BRS Potengi, BRS Nova Era, BRS Guariba e BRS Itaim) and two water status (with and without water deficit) with six replications. For the occurrence of drought held withholding water. We evaluated the stomatal conductance, transpiration, intercellular carbon dioxide concentration, photosynthetic rate and water use efficiency, through an infrared gas analyzer. It was concluded that water deficit in cowpea plants causes a decrease in stomatal conductance, transpiration, photosynthetic rate and intercellular carbon concentration, reaching values close to zero for the first three variables; and that among cowpea cultivars evaluated BRS Potengi is the most adapted and BRS Itaim is less adapted to water deficit conditions.

Keywords: stomatal conductance, transpiration, intercellular carbon, *Vigna unguiculata*

1. INTRODUÇÃO

O déficit hídrico é provavelmente o mais importante fator limitante da produção agrícola mundial e, por isso, alvo de inúmeros esforços de pesquisa no campo da fisiologia de plantas em condições de estresses ambientais, com o intuito de melhor compreender os mecanismos de defesa e determinar parâmetros e métodos rápidos de seleção de plantas tolerantes (JONES e CORLETT, 1992).

Entre as plantas classificadas como moderadamente tolerantes ao déficit hídrico, destaca-se o feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), uma espécie de ampla distribuição mundial, sobretudo em regiões tropicais, por apresentarem condições edafoclimáticas semelhantes às do seu provável berço de origem, no continente africano (FREIRE FILHO et al., 2005).

O requerimento de água nas plantas de feijão-caupi é variável com o seu estágio de desenvolvimento (LIMA et al., 2007) e aumenta de um valor mínimo na germinação até um valor máximo na floração e formação de vagens, decrescendo a partir do início da maturação (BASTOS et al., 2008). Embora as informações sobre os efeitos do estresse hídrico na floração do feijão-caupi sejam abundantes na literatura, poucos são os relatos sobre as consequências no período vegetativo da cultura.

As respostas das plantas às condições de estresse hídrico são influenciadas pela espécie, cultivar, tempo de exposição, fatores edáficos, entre outros. Assim, não existe uma única característica fisiológica que, por si só, seja indicativa de tolerância à seca. Desta forma, o ideal é considerar mais de uma característica, tais como potencial hídrico, condutância estomática, temperatura e transpiração foliar, para avaliar as respostas das espécies vegetais ao estresse hídrico (NOGUEIRA et al., 2001).

A adaptação ao déficit hídrico é considerada uma característica multigênica (PASSIOURA, 1997), e existem diferenças na tolerância à seca entre genótipos de feijão-caupi (GWATHMEY e HALL, 1992; ISMAIL et al., 1994). Os principais mecanismos adaptativos do feijão-caupi são o desenvolvimento do sistema radicular e a alta condutividade hidráulica das raízes, para 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). Entre estes mecanismos desenvolvidos para minimizar as perdas de água, o controle da abertura estomática parece ser uma

característica herdável, sob controle de genes nucleares (JONES, 1998). Porém, apesar de permitir uma maior conservação de água, o fechamento dos estômatos causa redução da assimilação de gás carbônico e, conseqüentemente, diminuição da produtividade (PLAUT, 1994).

Sob condições de déficit hídrico, tem sido demonstrada a relação direta entre a redução da concentração intercelular de gás carbônico, em razão do fechamento estomático, e os decréscimos na taxa fotossintética, sobretudo no rendimento quântico do fotossistema II (OLIVEIRA et al., 2005; MENDES et al., 2007). Essas respostas podem ocorrer antes que haja uma variação mensurável da condição de hidratação da folha e podem ser iniciadas por sinais não hidráulicos da raiz que está experimentando uma aridez no solo (MATTOS et al., 2005). As raízes atuam como sensores do déficit de água no solo, que é detectado pelas células das raízes mesmo antes de qualquer déficit hídrico ser observado nas folhas, por meio de sinais (ácido abscísico) enviados à parte aérea das plantas (SALAH e TARDIEU, 1997).

O desenvolvimento de cultivares mais tolerantes a períodos de déficit hídrico no solo, tal como o desenvolvimento de mecanismos que auxiliem as plantas a tolerar períodos prolongados de seca, será essencial na manutenção da produção agrícola brasileira e mundial (NEPOMUCENO et al., 2001). As diferentes reações de cada genótipo a essas variações permitem que ele possa tolerá-las quando em níveis críticos mantendo, ainda assim, taxas adequadas de fotossíntese (RIBEIRO et al., 2004). Nesse sentido, objetivou-se neste trabalho avaliar o efeito do déficit hídrico durante o estágio vegetativo sobre as trocas gasosas e a eficiência fotossintética de diferentes cultivares de feijão-caupi.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação não climatizada, pertencente à Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD). As coordenadas geográficas do local são latitude 20°11'45" S, longitude 54°55'18" W e altitude de 452 m.

Foram utilizadas quatro cultivares de feijão-caupi: BRS Potengi, BRS Nova Era, BRS Guariba e BRS Itaim, sendo as três primeiras de porte semiereto e hábito de crescimento indeterminado; e a última de porte ereto e hábito de crescimento

determinado. Na sementeira, realizada no dia 05 de março de 2012, foram semeadas seis sementes por vaso, sendo posteriormente realizado o desbaste para quatro plântulas por vaso, com doze vasos para cada cultivar.

Os vasos de plástico com capacidade de cinco litros foram preenchidos com solo classificado como Latossolo Vermelho distroférico. A capacidade de campo do solo foi determinada pela técnica da pesagem, a qual consistiu em secar o solo contido nos vasos ao ar livre até massa constante e, a seguir, determinou-se a massa do vaso com o substrato para a obtenção do peso seco. Posteriormente, saturou-se o solo com água e, após total drenagem, determinou-se novamente a massa, obtendo-se o peso úmido. Com a diferença entre peso úmido e peso seco, obteve-se a quantidade de água necessária para manter o solo na capacidade de campo desejada. Os vasos foram pesados diariamente para a determinação da quantidade de água a se acrescentar para manter o solo contido nos vasos a 80% da capacidade de campo.

Quarenta dias após a sementeira, a irrigação foi suspensa em metade dos vasos de feijão-caupi, por um período de sete dias, até que a condutância estomática atingisse valores próximos a zero, para que então a irrigação fosse retomada nestes vasos.

As avaliações de condutância estomática (gs , $mol\ m^{-2}\ s^{-1}$), taxa transpiratória (E , $mmol\ H_2O\ m^{-2}\ s^{-1}$), concentração de carbono intercelular, (C_i , $mmol\ mol^{-1}$) e taxa fotossintética por unidade de área foliar (A , $\mu mol\ CO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$) foram realizadas diariamente no período entre 40 e 52 dias após a sementeira, entre 9:30 e 11:00h, no segundo trifólio completamente expandido a partir do ápice, por meio de um analisador de gases no infravermelho (IRGA) portátil, modelo LCi/LCpro (ADC Bioscientific Ltd, Hoddesdon, UK). O ar de referência foi coletado a aproximadamente 2 m de altura do solo e homogeneizado em um galão de 50 L antes de alcançar a câmara de assimilação. A eficiência instantânea do uso da água (A/E , em $mmol\ CO_2\ mol^{-1}\ H_2O$) foi calculada pela razão entre taxa fotossintética e taxa transpiratória. Os dados de radiação solar incidente ($W\ m^{-2}$) foram obtidos na estação meteorológica da Universidade Federal da Grande Dourados.

A temperatura ambiente e umidade relativa do ar foram determinadas por um termômetro/higrômetro digital com precisão de $\pm 0,1^\circ C$ e 1%. As condições climáticas durante o período de leituras são apresentadas na Figura 1.

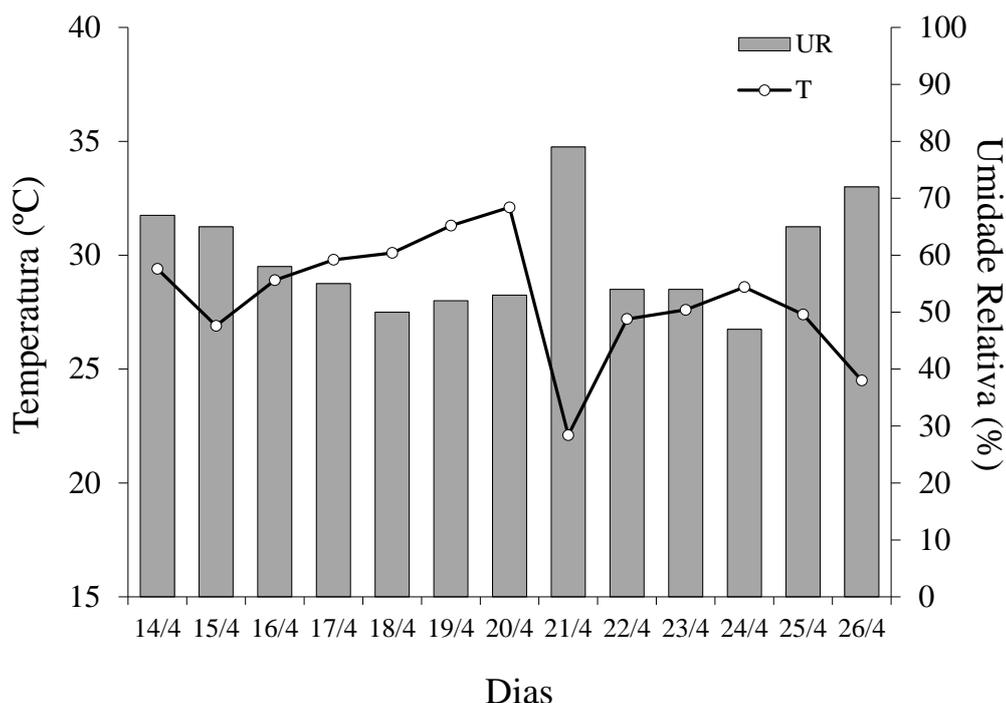


FIGURA 1. Temperatura e umidade relativa do ar no horário das leituras da taxa fotossintética e trocas gasosas das plantas de feijão-caupi.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com os tratamentos dispostos em um esquema fatorial 4x2, com quatro cultivares de feijão-caupi e dois status hídricos (com e sem déficit hídrico), em parcelas subdivididas no tempo, com seis repetições. Os gráficos foram elaborados com o auxílio do software estatístico SigmaPlot, versão 12.2. Os dados foram submetidos à análise de variância pelo Teste F e de normalidade pelo Teste de Lilliefors. As diferenças entre os status hídricos foram comparadas com o auxílio dos desvios padrão e as diferenças entre cultivares foram comparadas pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De maneira geral, os efeitos do déficit hídrico sobre as trocas gasosas (Figura 2) e a assimilação de CO₂ (Figura 3) nas quatro cultivares de feijão-caupi avaliadas foram significativos a partir do segundo dia de suspensão da irrigação. A diminuição das trocas gasosas e, conseqüentemente, da fotossíntese líquida pode ser explicada pelas respostas estomáticas à baixa reserva hídrica do substrato, já que o fechamento

estomático está relacionado, entre outros fatores, ao conteúdo de água no substrato (CHAVES et al., 2002).

A condutância estomática das plantas submetidas ao déficit hídrico reduziu-se a um valor próximo de zero em um período de seis dias após a suspensão da irrigação para a cultivar Potengi, cinco dias para as cultivares Nova Era e Guariba e quatro dias para a Itaim (Figura 2). A recuperação da condutância estomática nas plantas de feijão-caupi iniciou-se no dia seguinte à retomada da irrigação e atingiu valores similares ao controle após quatro dias de reidratação nas cultivares Potengi e Nova Era; e cinco dias para as cultivares Guariba e Potengi.

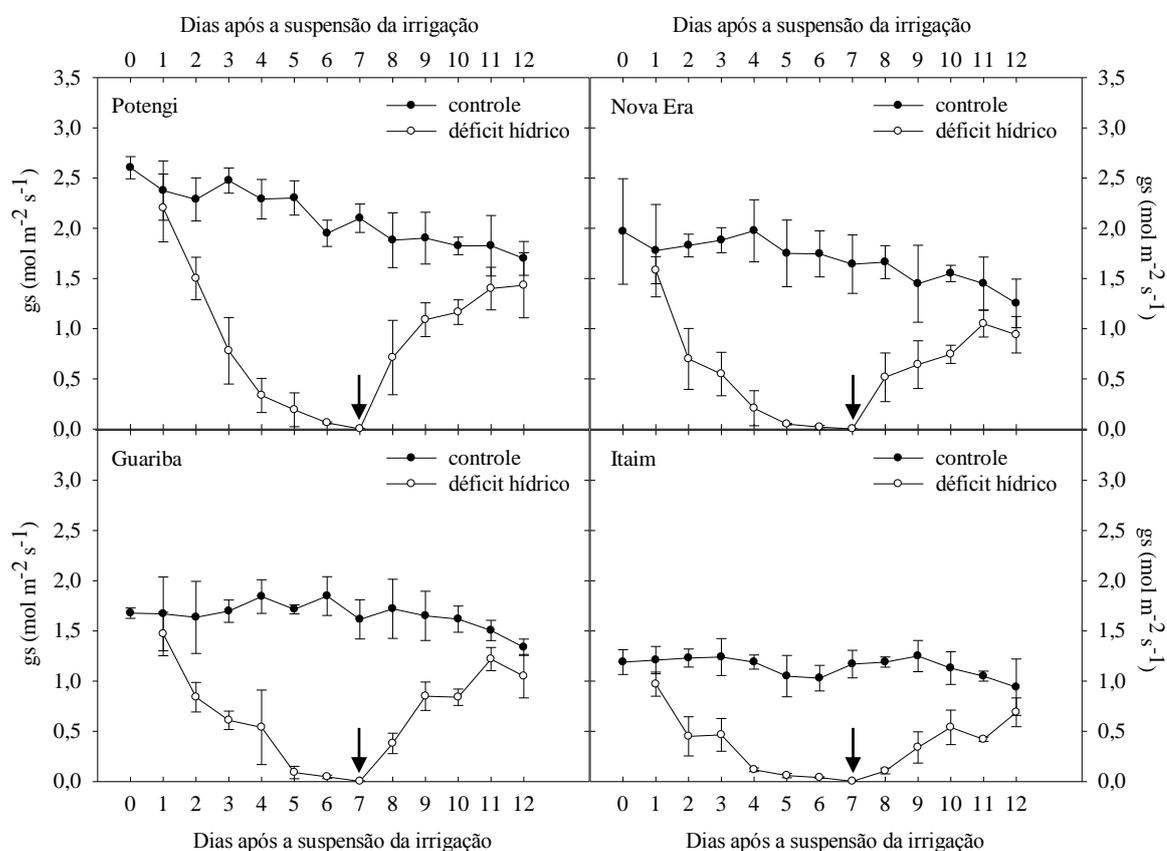


FIGURA 2. Condutância estomática (gs) de diferentes cultivares de feijão-caupi na ausência e presença de déficit hídrico. As setas indicam a retomada da irrigação e as barras os desvios padrão das médias.

Apesar de ser influenciada pela interação entre vários fatores ambientais, como luz, concentração de CO_2 na atmosfera, temperatura, umidade do solo e déficit de pressão de saturação do vapor no ar, torna-se evidente com os resultados obtidos o efeito do déficit hídrico sobre a condutância estomática e, por esse motivo, esta

característica pode ser utilizada como indicador de estresse hídrico em plantas de feijão-caupi. Resultados semelhantes foram observados nas culturas do feijão-comum (OLIVEIRA et al., 2005), da pupunheira (OLIVEIRA et al., 2002), do eucalipto (VELLINI et al., 2008) e do amendoim (NOGUEIRA e SANTOS, 2000).

A redução da condutância estomática e a inibição do aumento da área foliar estão entre as primeiras respostas ao déficit hídrico, protegendo as plantas contra as perdas de água e a desidratação celular. Nesse sentido, o fechamento estomático observado nas plantas de feijão-caupi sob déficit hídrico (Figura 2), resultou na diminuição da transpiração (Figura 3) já no primeiro dia após a suspensão da irrigação nas cultivares Guariba e Itaim; e no segundo dia para as cultivares Potengi e Nova Era, aproximando-se de zero nas mesmas épocas relatadas para a condutância estomática.

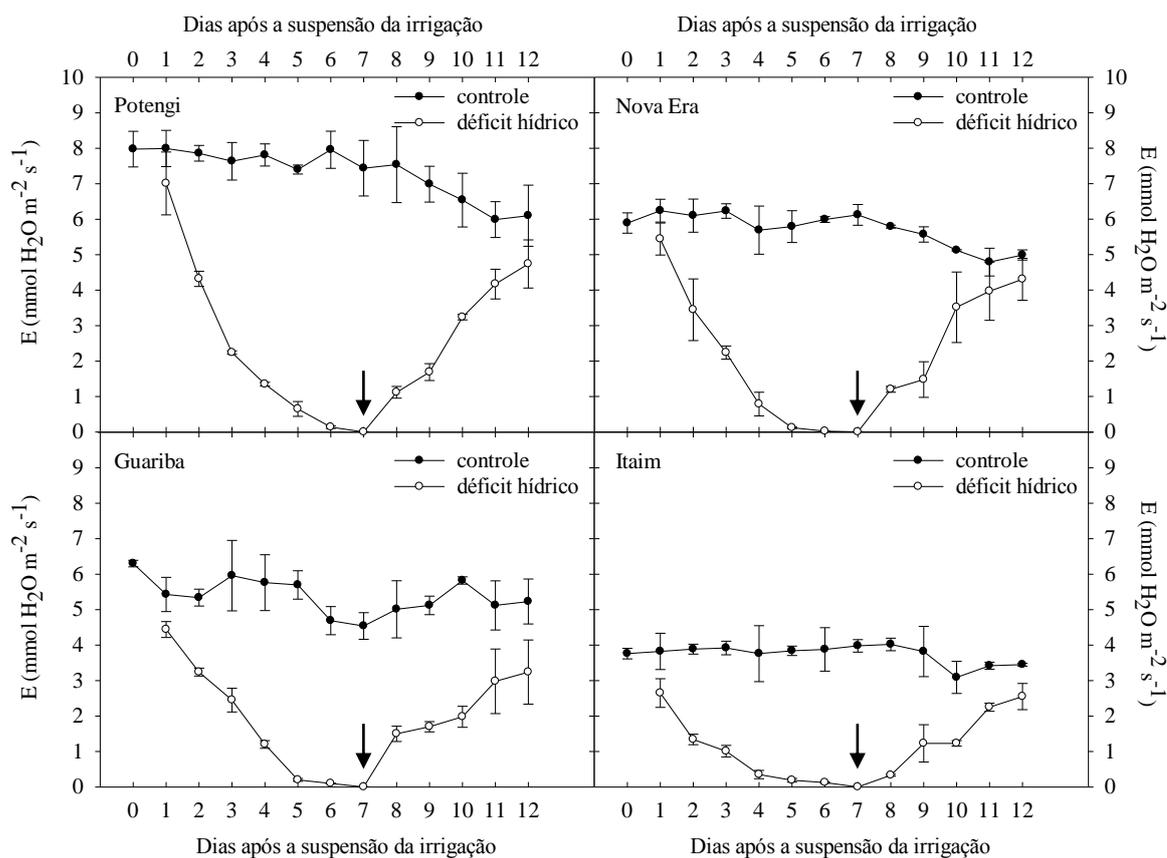


FIGURA 3. Transpiração (E) de diferentes cultivares de feijão-caupi na ausência e presença de déficit hídrico. As setas indicam a retomada da irrigação e as barras os desvios padrão das médias.

A transpiração pode ser definida como a perda de água na forma de vapor por meio dos estômatos e das cutículas das plantas, decorrente de fenômenos físicos e fisiológicos dos vegetais, dependente de fatores como água disponível no solo, radiação solar, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento, sendo governada principalmente pela resistência dos estômatos (PASSIOURA, 1997). Como o processo de transpiração envolve a transferência da água do solo, um dos atributos mais importantes é a umidade do substrato. Quando o solo está úmido, as plantas transpiram livremente e a taxa de transpiração é controlada pela atmosfera. Porém, quando o solo começa a perder água, o fluxo de transpiração começa a diminuir (LARCHER, 2006).

No ponto de máximo estresse hídrico, a concentração de carbono intercelular foi reduzida, em média, em 67% (Figura 4), sendo este efeito maior nas cultivares Nova Era (72%), Itaim (71%) e Guariba (69%) que na cultivar Potengi (58%). A concentração de carbono intercelular depende do fluxo de carbono pelos estômatos e é influenciado pela concentração do carbono ambiental, pela taxa de assimilação líquida e pela condutância estomática (JONES, 1998). Desta forma, o fechamento estomático resultou em menores valores de carbono intercelular durante o período de déficit hídrico, que após a retomada da irrigação se aproximaram gradativamente dos valores obtidos no tratamento controle.

Em resposta ao déficit hídrico, a taxa de assimilação de carbono seguiu um padrão semelhante ao descrito para as avaliações anteriores (Figura 5). As plantas normalmente apresentam um decréscimo análogo entre a fotossíntese e a condutância estomática à medida que o déficit hídrico se torna mais severo (CALBO e MORAES, 2000). A abertura estomática regula a saída de vapor de água da planta e, ao mesmo tempo, a entrada de gás carbônico para a fotossíntese. Geralmente a taxa de fotossíntese decresce a níveis próximos de zero em potências de água que induzem o fechamento estomático (TURNER, 1979).

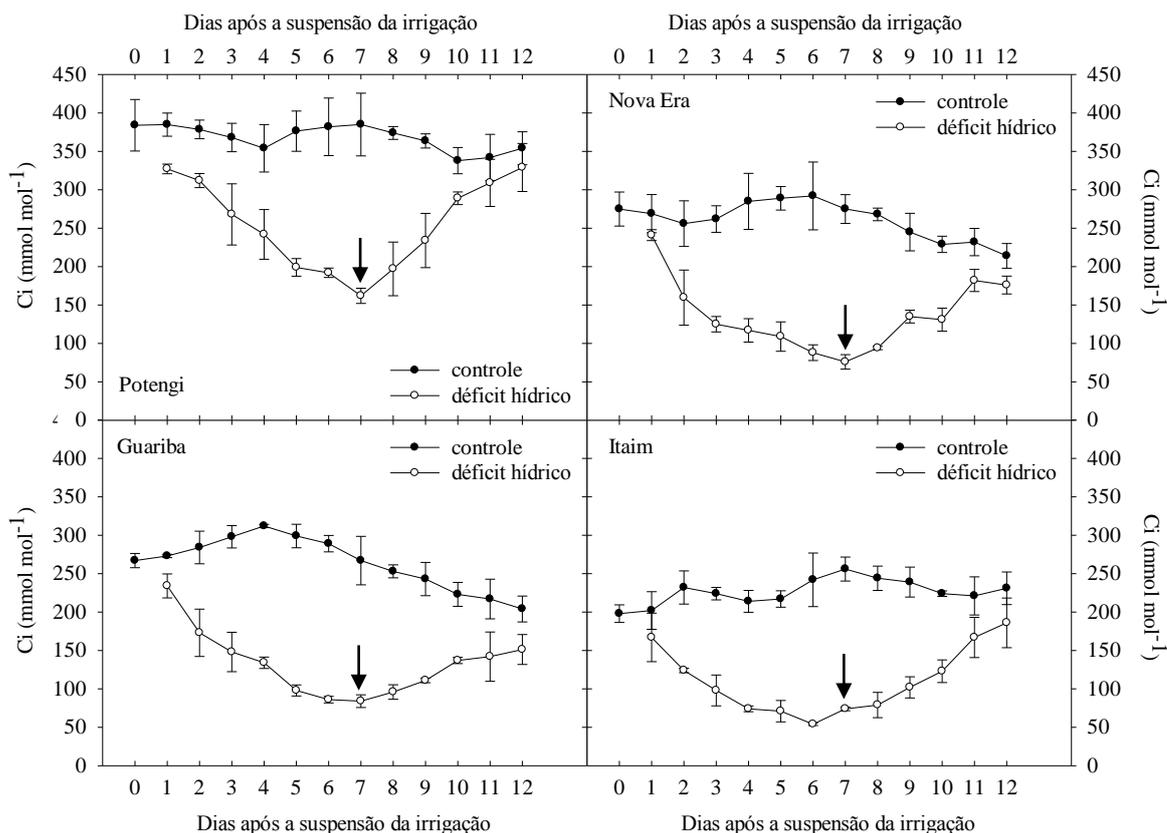


FIGURA 4. Concentração de carbono intercelular (C_i) de diferentes cultivares de feijão-caupi na ausência e presença de déficit hídrico. As setas indicam a retomada da irrigação e as barras os desvios padrão das médias.

O aumento da taxa fotossintética observado após a retomada da irrigação (Figura 5) está diretamente relacionado à diminuição da limitação estomática. Quando os valores de carbono intercelular diminuem com a redução da condutância estomática, pode-se inferir que a limitação estomática é o fator principal de limitação do desempenho fotossintético, pois quanto maior a abertura estomática maior a difusão de gás carbônico para a câmara subestomática (ISMAIL et al., 1994).

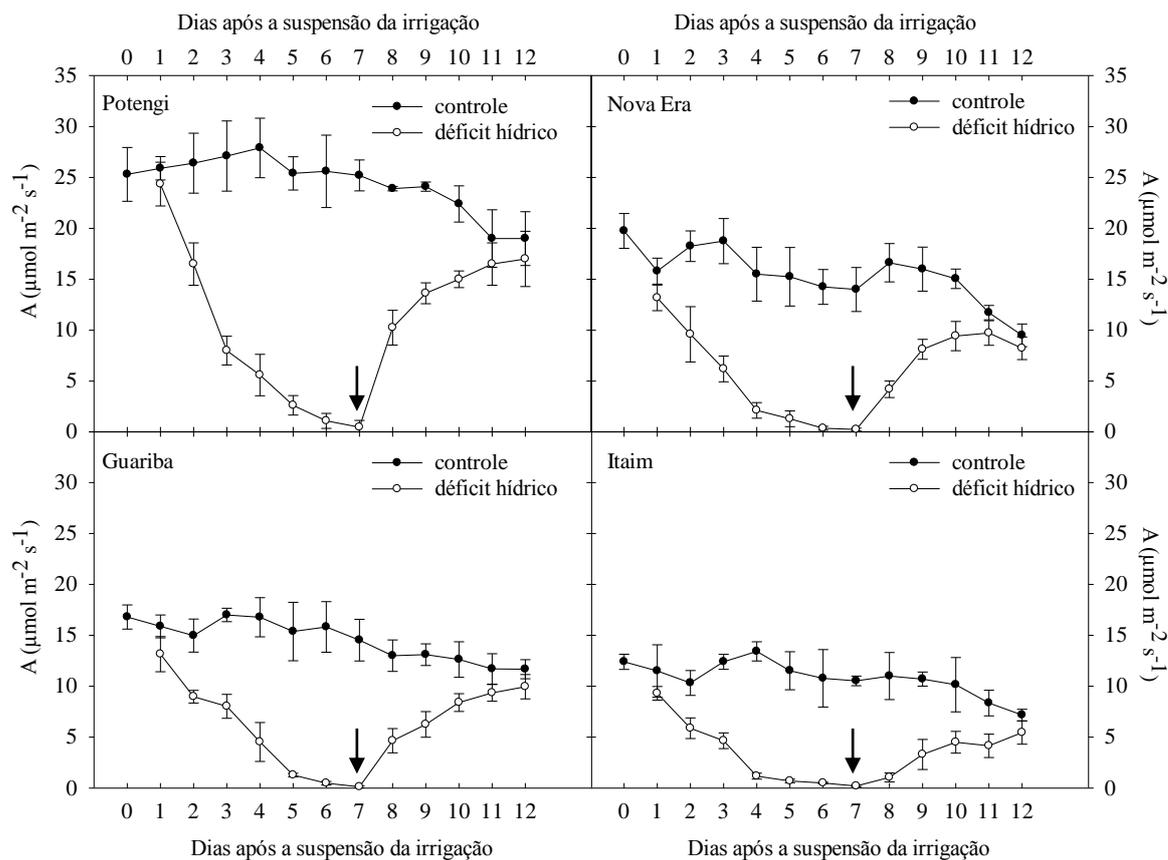


FIGURA 5. Taxa fotossintética (A) de diferentes cultivares de feijão-caupi na ausência e presença de déficit hídrico. As setas indicam a retomada da irrigação e as barras os desvios padrão das médias.

Com exceção da cultivar Guariba, os valores máximos de eficiência instantânea do uso da água (Figura 6) foram observados nos dias com menores valores de condutância estomática (Figura 2) e transpiração (Figura 3), o que demonstra que o fechamento dos estômatos afetou mais a transpiração que a fotossíntese das plantas de feijão-caupi. A eficiência instantânea do uso da água é caracterizada como a quantidade de água transpirada por uma cultura para a produção de certa quantidade de matéria seca (SILVA et al., 2007). Assim, culturas mais eficientes no uso da água podem produzir quantidade maior de matéria seca por grama de água transpirada, fenômeno que torna as plantas mais competitivas em situações de déficit hídrico (TAIZ e ZEIGER, 2009). Desta forma, é possível perceber que o retardo da dessecação realizado pelas plantas de feijão-caupi por meio da drástica redução de sua condutância estomática é compensada pela alta eficiência instantânea no uso da água em situações de estresse hídrico.

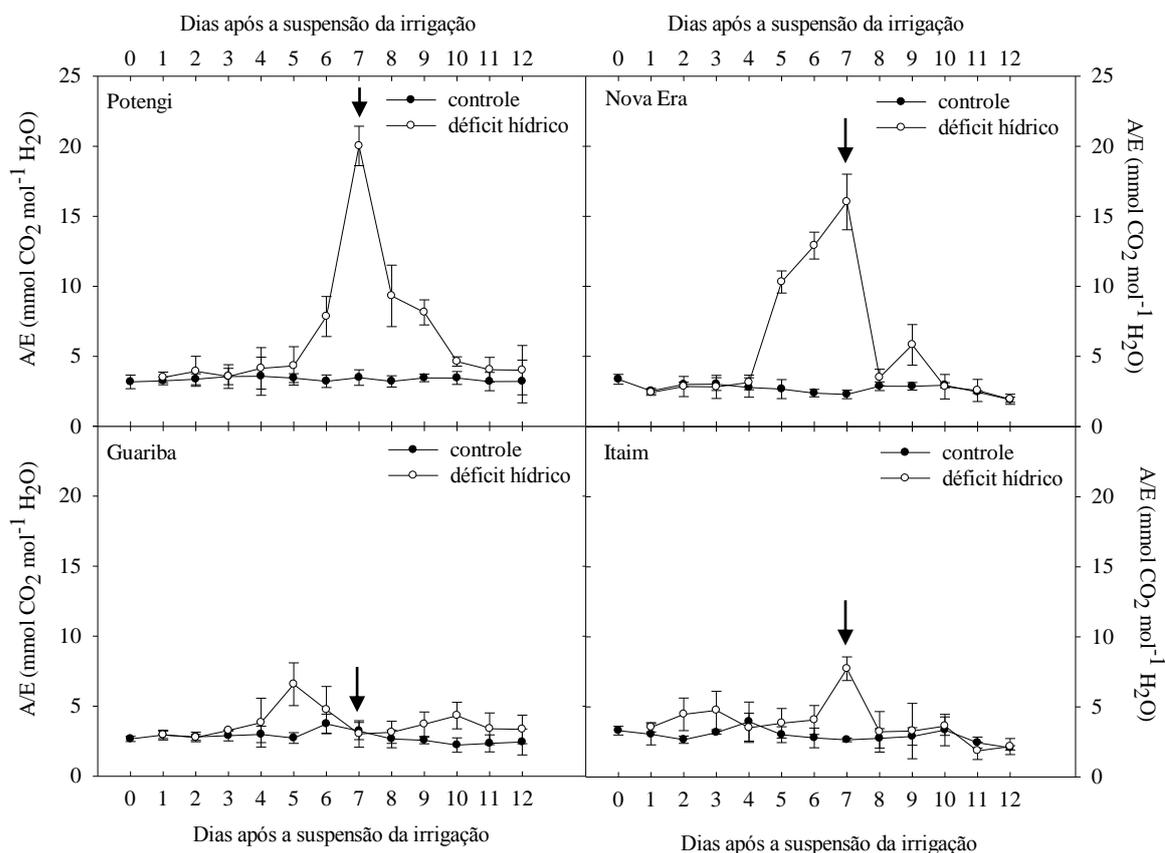


FIGURA 6. Eficiência instantânea do uso da água (A/E) de diferentes cultivares de feijão-caupi na ausência e presença de déficit hídrico. As setas indicam a retomada da irrigação e as barras os desvios padrão das médias.

Na comparação entre as cultivares, as maiores médias de condutância estomática (Figura 7), transpiração (Figura 7), concentração de carbono intercelular (Figura 8), taxa fotossintética (Figura 8) e eficiência instantânea do uso da água (Figura 9) foram observadas na cultivar Potengi, as menores médias foram observadas na cultivar Itaim, enquanto as cultivares Nova Era e Guariba apresentaram valores intermediários entre as duas. Entretanto, embora tenham sido observadas diferenças em valores absolutos nas respostas das cultivares ao déficit hídrico, é possível observar um mesmo padrão de resposta em relação ao tempo de exposição ao estresse e à retomada da irrigação nas quatro cultivares de feijão-caupi avaliadas (Figuras 2 a 6).

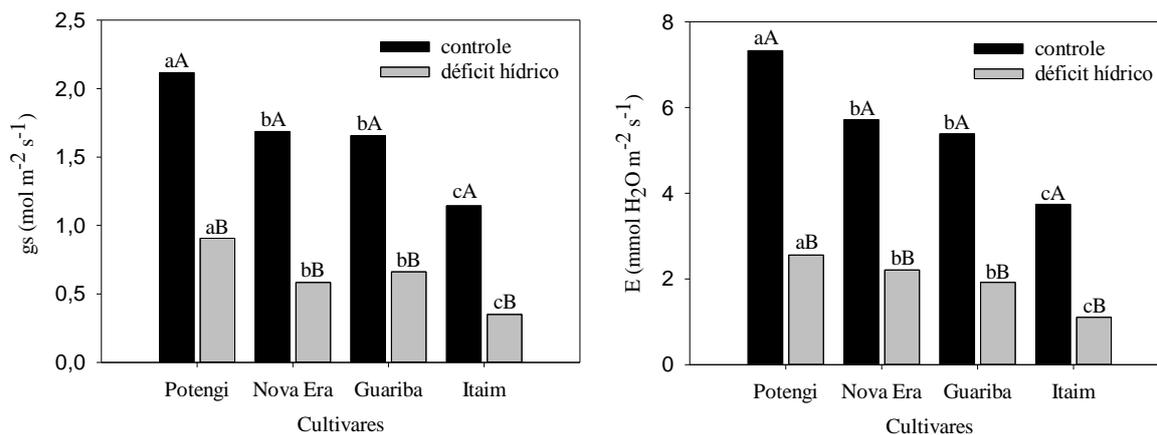


FIGURA 7. Condutância estomática (g_s) e transpiração (E) médias de diferentes cultivares de feijão-caupi na ausência e presença de déficit hídrico. As letras, minúsculas em um mesmo status hídrico e maiúsculas em uma mesma cultivar, indicam as diferenças entre as médias pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade.

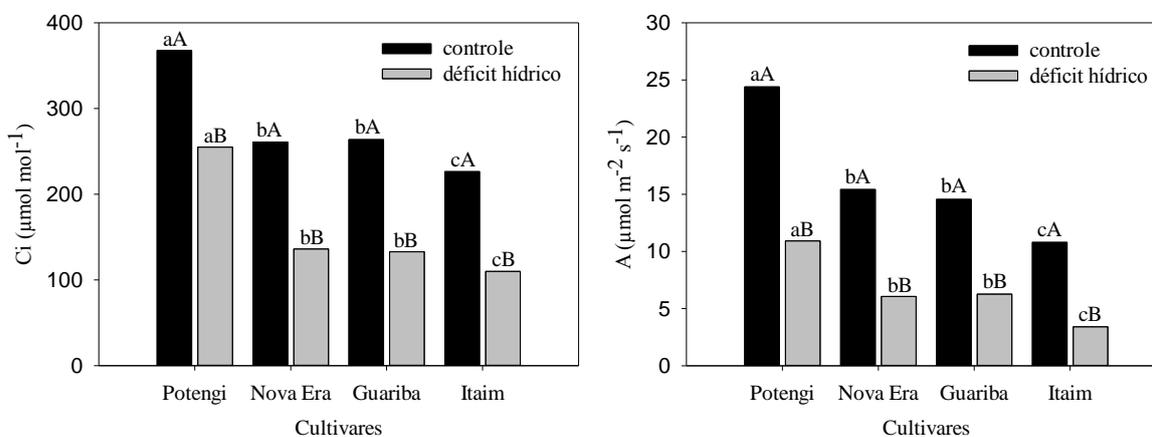


FIGURA 8. Concentração de carbono intercelular (C_i) e taxa fotossintética (A) médias de diferentes cultivares de feijão-caupi na ausência e presença de déficit hídrico. As letras, minúsculas em um mesmo status hídrico e maiúsculas em uma mesma cultivar, indicam as diferenças entre as médias pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade.

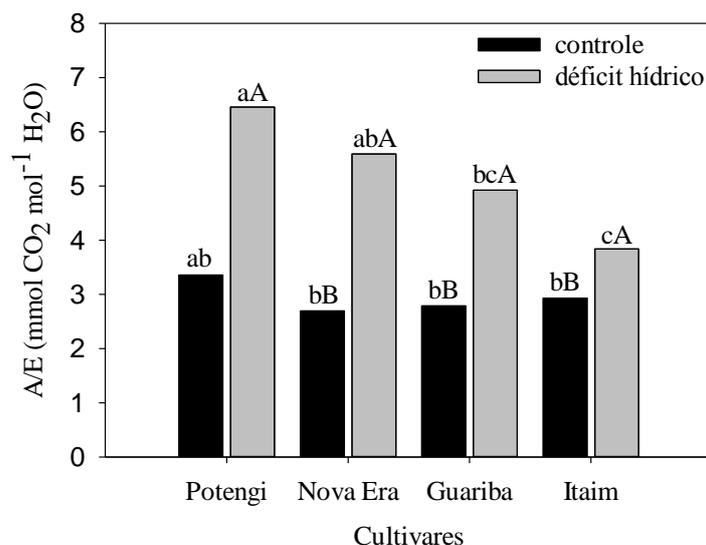


FIGURA 9. Eficiência instantânea do uso da água (A/E) médias de diferentes cultivares de feijão-caupi na ausência e presença de déficit hídrico. As letras, minúsculas em um mesmo status hídrico e maiúsculas em uma mesma cultivar, indicam as diferenças entre as médias pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade.

A condutância foliar é composta em pequena parte pela condutância cuticular da epiderme e, quando os estômatos estão abertos, pela condutância estomática, que é controlada pelas células-guarda dos estômatos (BASTOS et al., 2008). Assim, a condutância estomática é proporcional ao número e tamanho dos estômatos e diâmetro da abertura estomática, características que dependem de fatores genéticos e ambientais (BRODRIBB e HOLBROOK, 2003). Deste modo, as diferenças genéticas em relação à fotossíntese são consideráveis, pois a eficiência com que a energia radiante é convertida em formas químicas depende das propriedades anatômicas das folhas (LANDSBERG, 1986), como eficiência e quantidade de enzimas de carboxilação, e facilidade com que o ar pode se difundir nos espaços intercelulares (LARCHER, 2006).

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos e nas condições em que o experimento foi realizado, pode-se concluir que o déficit hídrico em plantas de feijão-caupi resulta na diminuição da condutância estomática, da transpiração, da taxa fotossintética e da concentração de carbono intercelular, diminuindo a valores próximos de zero para as três primeiras características; as cultivares BRS Potengi e BRS Itaim possuem, respectivamente, a maior e a menor adaptação às condições de déficit hídrico entre as cultivares estudadas; e que o fechamento estomático em plantas sob déficit hídrico é compensado pelo aumento na eficiência instantânea do uso da água.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASTOS, E.A.; FERREIRA, V.M.; SILVA, C.R.; ANDRADE JÚNIOR, A.S. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do feijão-caupi no vale do Gurguéia, PI. **Irriga**, v.13, p.182-190, 2008.

BRODRIBB, T.J.; HOLBROOK, N.M. Stomatal closure during leaf dehydration, correlation with other leaf physiological traits. **Plant Physiology**, v.132, p.2166-2173, 2003

CALBO, M.E.R.; MORAES, J.A.P.V. de. Efeitos da deficiência de água em plantas de *Euterpe oleracea* (açai). **Revista Brasileira de Botânica**, v.23, p.225-230, 2000.

CHAVES, M.M.; PEREIRA, J.S.; MAROCO, J.; RPDRIGUES, M. L.; RICARDO, C.P.; OSORIO, M.L.; CARVALHO, I.; FARIA, T.; PINHEIRO, C. How plants cope with water stress in the field. Photosynthesis and growth. **Annals of Botany**, v.89, p.907-916, 2002.

FREIRE FILHO, F.R.; RIBEIRO, V.Q.; BARRETO, P.D.; SANTOS, A.A. dos. Melhoramento genético. In: **feijão-caupi: avanços tecnológicos**. Brasília (DF): Embrapa Informação Tecnológica, 2005. p.2992.

GWATHMEY, C.O.; HALL, A.E. Adaptation to midseason drought of cowpea genotypes with contrasting senescence traits. **Crop Science**, v.32, p.773-778, 1992.

ISMAIL, A.M.; HALL, A.E.; BRAY, E.A. Drought and pot size effects on transpiration efficiency and carbon isotope discrimination of a cowpea accessions and hybrids. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.21, p.23-35, 1994.

JONES, H.G. Stomatal control of photosynthesis and transpiration. **Journal of Experimental Botany**, v.49, p.387-398, 1998.

JONES, H.G.; CORLETT, J.E. Current topics in drought physiology. **Journal of Agricultural Science**, v.119, p.291-296, 1992.

LANDSBERG, J.J. **Physiological Ecology of Forest Production**. Orlando: Academic Press, 1986. 198p.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RIMA Artes e Textos, 2006. 532p.

LIMA, C.J.G.S.; OLIVEIRA, F.A.; MEDEIROS, J.F.; OLIVEIRA, M.K.T.; ALMEIDA JÚNIOR, A.B. Resposta do feijão-caupi a salinidade da água de irrigação. **Revista Verde**, v.2, p.79-86, 2007.

MATTOS, J.L.S.; GOMIDE, J.A. ; HUAMAN, C.A.M. Crescimento de espécies do gênero *Brachiaria*, sob déficit hídrico, em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.34, p.746-754, 2005.

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.

NEPOMUCENO, A.L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J.R.B.; OYA, T. Tolerância à seca em plantas: Mecanismos fisiológicos e moleculares. **Revista Biotecnologia, Ciência & Desenvolvimento**, v.23, p.12-18, 2001.

NOGUEIRA, R.J.M.C.; MORAES, J.A.P.V; BURITY, H.A.; BEZERRA NETO, E. Alterações na resistência à difusão de vapor das folhas e relações hídricas em aceroleiras submetidas a déficit de água. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.13, p.75-87, 2001.

NOGUEIRA, R.J.M.C.; SANTOS, R.C. dos. Alterações fisiológicas no amendoim submetido ao estresse hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, p.4145, 2000.

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

OLIVEIRA, J.; ALVES, P.L.C.A.; MAGALHAES, A.C. The effect of chilling on the photosynthetic activity in coffee (*Coffea Arabica* L.) seedlings: The protective action of chloroplastid pigments. **Brazilian Journal Plant Physiology**, v.14, p.95-104, 2002.

PASSIOURA, J.B. Drought and drought tolerance. In: BELHASSEN, I. (Ed.). **Drought tolerance in higher plants: genetical, physiological, and molecular biological analysis**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1997. p.1-7.

PLAUT, Z. Photosynthesis in plant/crops under water and salt stress. In: PESSARAKLI, M. (Ed.) **Handbook of plant and crop stress**. New York: Marcel Dekker, 1994. p.587-603.

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

SALAH, H.B.H.; TARDIEU, F. Control of leaf expansion rate of droughted maize plants under fluctuating evaporative demand. **Plant Physiology**, v.114, p.893-900, 1997.

SILVA, A.A.; FERREIRA, F.A.; FERREIRA, L.R.; SANTOS, J.B. Biologia de plantas daninhas. In: SILVA, A.A.; SILVA, J.F. **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa: Editora UFV, 2007. p.17-61.

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**, v.14, p.469-529, 1995.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto. Alegre: Artmed, 2009. 819p.

TURNER, N.C. Drought resistance and adaptation to water deficits in crop plants. In: MUSSEL, H.; STAPLES, R.C. (Eds.). **Stress physiology in crop plants**. New York: Wiley Interscience, 1979. p.468-478.

VELLINI, A.L.T.T.; PAULA, N.F. de; ALVES, P.L.C.A.; PAVANI, L.C.; BONINE, C.A.V.; SCARPINATI, E.A.; PAULA, R.C. de. Respostas fisiológicas de diferentes clones de eucalipto sob diferentes regimes de irrigação. **Revista Árvore**, v.32, p.651-663, 2008.

CAPÍTULO II - ÍNDICE DE ESTRESSE HÍDRICO PARA A CULTURA DO FEIJÃO-CAUPI BASEADO NA TERMOMETRIA POR INFRAVERMELHO

RESUMO. Objetivou-se neste trabalho estimar um modelo de índice de estresse hídrico para a cultura do feijão-caupi com base na temperatura foliar, determinada com o auxílio da termometria por infravermelho, e a temperatura do ar. O experimento foi realizado em Dourados, MS, Brasil, em casa de vegetação. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com os tratamentos dispostos em um esquema fatorial 4x2, com quatro cultivares de feijão-caupi (BRS Potengi, BRS Nova Era, BRS Guariba e BRS Itaim) e dois status hídricos (com e sem déficit hídrico), com seis repetições. Para a simulação do déficit hídrico realizou-se a suspensão da irrigação. Foram avaliadas a temperatura foliar, por meio de um termômetro a infravermelho, a temperatura e umidade relativa do ar, por um termômetro/higrômetro digital portátil. Concluiu-se que a termometria por infravermelho pode ser utilizada para estimar indiretamente a disponibilidade hídrica no solo em plantas de feijão-caupi, com base na diferença entre temperatura foliar e do ar; e que o modelo de índice de estresse hídrico para a cultura do feijão-caupi deve levar em consideração, além da diferença entre temperatura foliar e temperatura do ar, o déficit da pressão de saturação de vapor no ar e a radiação solar global incidente.

Palavras-chave: temperatura foliar, temperatura do ar, déficit hídrico, *Vigna unguiculata*

CROP WATER STRESS INDEX TO COWPEA BASED ON INFRARED THERMOMETRY

ABSTRACT. The objective of this work to estimate a model of crop water stress index to cowpea based on leaf temperature, determined with the aid of infrared thermometry, and air temperature. The experiment was conducted in Dourados, MS, Brazil, in a greenhouse. The experimental design was a completely randomized design with treatments in a 4x2 factorial design, with four cowpea cultivars (BRS Potengi, BRS Nova Era, BRS Guariba e BRS Itaim) and two water status (with and without water deficit) with six replications. For the occurrence of drought held withholding water. We evaluated the leaf temperature, through an infrared thermometer, and the temperature and relative humidity, for a thermometer / hygrometer digital portable. It was concluded that infrared thermometry can be used to estimate soil water availability based on plant water status, the phenological stage of growth of cowpea and the model crop water stress index for cowpea should take into consideration, besides the different between leaf temperature and air temperature, the saturation vapour pressure deficit and the incident solar radiation.

Keywords: leaf temperature, air temperature, water deficit, *Vigna unguiculata*

1. INTRODUÇÃO

A compreensão das respostas fisiológicas das plantas aos fatores ambientais, como a escassez ou o excesso de água no solo, temperaturas baixas ou elevadas, salinidade, entre outros, deixou de ser visto como uma simples questão fisiológica ou ecológica, tornando-se uma importante ferramenta para minimizar perdas nas produtividades agrícolas (LARCHER, 2006).

Ao contrário do feijão-comum e de outras fabáceas, o feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) adapta-se relativamente bem a uma ampla faixa de clima e de solo, e sua baixa demanda hídrica, em torno de 300 mm, faz da espécie uma alternativa para a produção de grãos em municípios onde o risco climático é considerado alto (LINHARES, 2007).

Na absorção de gás carbônico pelas folhas, as plantas inevitavelmente perdem água na forma de vapor (JONES, 1998). Essa perda de água ocorre principalmente por meio dos estômatos, que apresentam mecanismos para controlar seu grau de abertura. Esse controle é atribuído à condutância estomática foliar, frequentemente utilizada como indicador da deficiência hídrica (McDERMIT, 1990). O controle estomático é uma importante propriedade fisiológica por meio da qual as plantas limitam a perda de água, por meio da redução da condutância e, portanto, das trocas gasosas, como forma de resposta das plantas a diversos fatores, incluindo o déficit hídrico (PAIVA et al., 2005).

A perda de água por meio da transpiração, além de manter um gradiente de potencial hídrico na planta, possui também a função de diminuir a temperatura foliar, devido à perda de calor latente (OLIVEIRA et al., 2005), para manter a planta protegida de altas temperaturas. Desta forma, sob condições de déficit hídrico, a temperatura foliar se apresenta geralmente mais elevada que a temperatura do ar (NOGUEIRA et al., 1998), podendo, desta forma, ser utilizado como indicador do status hídrico das plantas (JUNG e SCOTT, 1980).

Entre os métodos de determinação da temperatura foliar, destaca-se a utilização de termômetros a infravermelho, que determinam a temperatura por meio da radiação com ondas na região infravermelha do espectro eletromagnético (SANMARTIN e ACEVEDO, 2001). Estes termômetros possuem relativa facilidade de uso, rapidez nas medições e não necessitam de contato ou destruição das plantas amostradas (KIRKHAN, 2004).

Desta forma, com base na diferença entre a temperatura foliar e a temperatura do ar é possível estimar índices de estresse hídrico para as culturas agrícolas (IDSO et al., 1981), normalizados pelo déficit da pressão de saturação de vapor no ar, que atua sobre a condutância estomática e a radiação solar incidente que, ao ser absorvida pela folha, pode ocasionar aumentos na temperatura do dossel (WANG e GARTUNG, 2010). Assim, para a criação de um modelo de índice de estresse hídrico é necessário determinar experimentalmente as diferenças entre temperatura foliar e temperatura do ar em condições de ausência e presença de déficit hídrico severo, de modo a estimar, respectivamente, a linha base inferior e a linha base superior do modelo (JACKSON et al., 1981).

Nesse sentido, objetivou-se neste trabalho estimar um modelo de índice de estresse hídrico para a cultura do feijão-caupi com base na temperatura foliar, determinada com o auxílio da termometria por infravermelho, e a temperatura do ar.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação não climatizada, coberta com filme transparente de polietileno, pertencente à Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD). As coordenadas geográficas do local são latitude 20°11'45" S, longitude 54°55'18" W e altitude de 452 m.

Foram utilizadas quatro cultivares de feijão-caupi: BRS Potengi, BRS Nova Era, BRS Guariba e BRS Itaim, sendo as três primeiras de porte semiereto e hábito de crescimento indeterminado; e a última de porte ereto e hábito de crescimento determinado. Na semeadura, realizada no dia 05 de março de 2012, foram semeadas seis sementes por vaso, sendo posteriormente realizado o desbaste para quatro plântulas por vaso, com doze vasos para cada cultivar.

Os vasos de plástico com capacidade de cinco litros foram preenchidos com solo classificado como Latossolo Vermelho distroférico. A capacidade de campo do solo foi determinada pela técnica da pesagem, a qual consistiu em secar o solo contido nos vasos ao ar livre até massa constante e, a seguir, determinou-se a massa do vaso com o substrato para a obtenção do peso seco. Posteriormente, saturou-se o solo com água e, após total drenagem, determinou-se novamente a massa, obtendo-se o peso úmido. Com a diferença entre peso úmido e peso seco, obteve-se a quantidade

de água necessária para manter o solo na capacidade de campo desejada. Os vasos foram pesados diariamente para a determinação da quantidade de água a se acrescentar para manter o solo contido nos vasos a 80% da capacidade de campo. Quarenta dias após a semeadura, a irrigação foi suspensa em metade dos vasos de feijão-caupi, por um período de sete dias, quando foi então retomada.

A temperatura ambiente e umidade relativa do ar foram determinadas diariamente no período entre 40 e 52 dias após a semeadura, entre 9 e 15h, por um termômetro/higrômetro digital portátil com precisão de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ e 1%. As condições climáticas durante o período de leituras são apresentadas na Figura 1. A temperatura foliar foi obtida a partir do posicionamento de um termômetro a infravermelho (modelo MiniTemp MT4, Raytek, Santa Cruz, CA, USA) em três pontos distintos da superfície foliar, a uma distância de cerca de 5 cm. O termômetro a infravermelho apresentava um campo de visada de 15° e estava equipado com um filtro espectral na faixa de 8 a 14 μm , com exatidão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Os dados de radiação solar incidente foram obtidos na estação meteorológica da Universidade Federal da Grande Dourados.

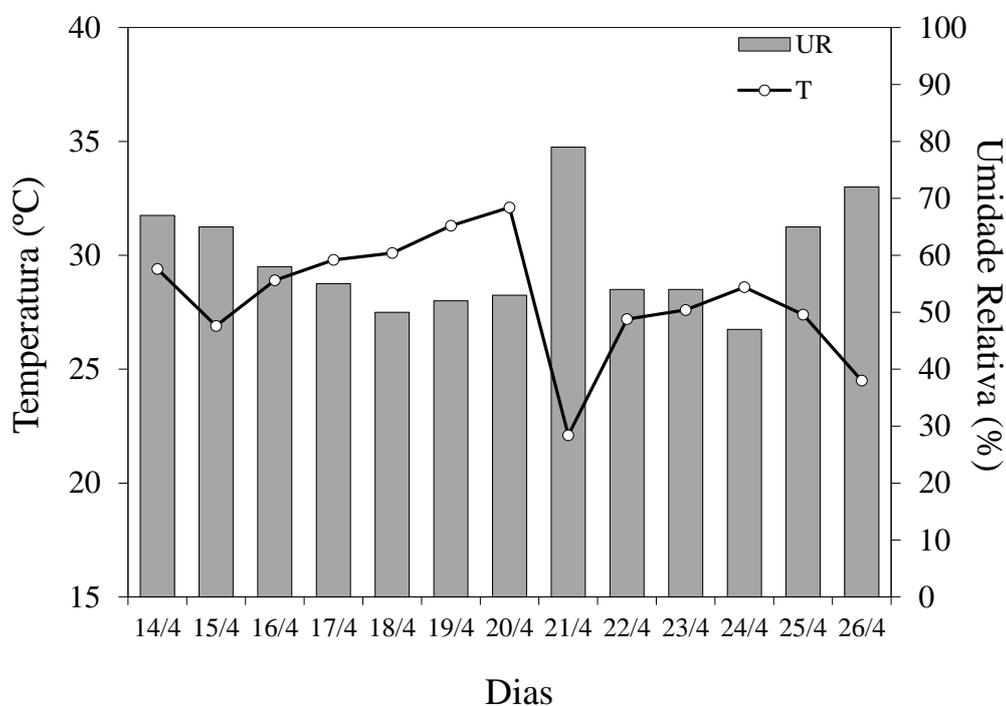


FIGURA 1. Temperatura e umidade relativa do ar no horário das leituras da temperatura foliar e condições climáticas.

O déficit da pressão de saturação de vapor no ar (DPV_{ar} , em kPa) foi calculado por meio do método de Penman-Monteith FAO (PM-FAO) e os procedimentos sugeridos pelo boletim da FAO N° 56, calculado por:

$$DPV_{ar} = es - ea$$

em que DPV_{ar} = déficit da pressão de saturação de vapor no ar, em kPa; es = pressão de saturação de vapor, em kPa; e ea = pressão parcial de vapor, em kPa.

A pressão de saturação de vapor foi calculada pela fórmula:

$$es = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27T}{T + 237,3}\right)$$

em que es = pressão de saturação de vapor, em kPa; T = temperatura, em °C.

A pressão parcial de vapor foi calculada por meio da seguinte fórmula:

$$ea = es \cdot \left(\frac{UR}{100}\right)$$

em que ea = pressão parcial de vapor, em kPa; es = pressão de saturação de vapor, em kPa; e UR é a umidade relativa do ar, em %.

O índice de estresse hídrico da cultura foi estimado pela diferença entre a temperatura do dossel e do ambiente, comparada com os resultados em condições de déficit hídrico severo e de ausência de limitação de água, denominados, respectivamente, linha base superior e linha base inferior (JACKSON et al., 1981), por meio da seguinte fórmula:

$$IEHC = \frac{(t_c - t_a) - (t_c - t_a)_{LBI}}{(t_c - t_a)_{LBS} - (t_c - t_a)_{LBI}}$$

em que: $IEHC$ significa índice de estresse hídrico para a cultura; $t_c - t_a$ é a diferença de temperatura entre a folha e o ar (°C); $(t_c - t_a)_{LBI}$ é a linha base inferior, obtida na ausência de estresse hídrico; $(t_c - t_a)_{LBS}$ é a linha base superior, obtida em condições de estresse hídrico severo. As relações entre temperatura foliar, temperatura do ar, déficit da pressão de saturação de vapor no ar e radiação solar incidente, bem como o

índice de estresse hídrico da cultura foram calculados com os dados de todas as cultivares, com o intuito de estimar um modelo para a cultura do feijão-caupi.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com os tratamentos dispostos em um esquema fatorial 4x2, com quatro cultivares de feijão-caupi e dois status hídricos (com e sem déficit hídrico), em parcelas subdividas no tempo, com seis repetições. Os gráficos foram elaborados com o auxílio do software estatístico SigmaPlot, versão 12.2. Os dados foram submetidos à análise de variância pelo Teste F e as diferenças entre as cultivares foram comparadas pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O efeito do déficit hídrico sobre a temperatura foliar nas plantas de feijão-caupi pode ser observado a partir do terceiro dia após a suspensão da irrigação para a cultivar Potengi e após dois dias para as demais cultivares (Figura 2). Durante o momento de maior efeito do déficit hídrico, que ocorreu próximo aos sete dias após o início do estresse para todas as cultivares avaliadas, foi observado a maior diferença na temperatura foliar entre as plantas com e sem déficit hídrico, diferença esta que deixou de ser significativa quatro dias após a retomada da irrigação na cultivar Potengi e cinco dias para as cultivares Nova Era, Guariba e Itaim.

A temperatura foliar tende a acompanhar a temperatura ambiente, com a manutenção de temperaturas iguais ou inferiores às do ambiente devido à estreita relação entre temperatura foliar, resistência estomática e transpiração das plantas. Assim, a diferença de temperatura foliar em plantas com e sem estresse se fundamenta no teor de água do substrato, no estado hídrico das plantas, no comportamento estomático e na perda de calor latente por meio da transpiração (LANDSBERG, 1986; LUDLOW e MUCHOW, 1990). Essa capacidade de refrigeração das plantas via transpiração, por meio da manutenção de elevada condutância estomática, possui o intuito de manter a planta protegida dos efeitos do estresse térmico (JARVIS, 1976).

Entre as cultivares, as maiores reduções de temperatura foliar em relação à temperatura ambiente no tratamento controle foram observadas na cultivar Potengi, e as menores na cultivar Itaim (Figura 3). Na média entre as cultivares, as folhas de

feijão-caupi de plantas sem restrições hídricas apresentaram reduções na temperatura foliar de -4°C em relação à temperatura ambiente, enquanto as folhas de plantas sob déficit hídrico apresentaram, no auge do déficit hídrico, temperaturas médias 3°C maiores que a temperatura ambiente. À medida que a água se torna limitante, a transpiração é reduzida, ocorrendo o aumento da temperatura foliar pela dissipação não fotoquímica da radiação solar incidente, na forma de calor latente (GONTIA e TIWARI, 2008; WANG e GARTUNG, 2010).

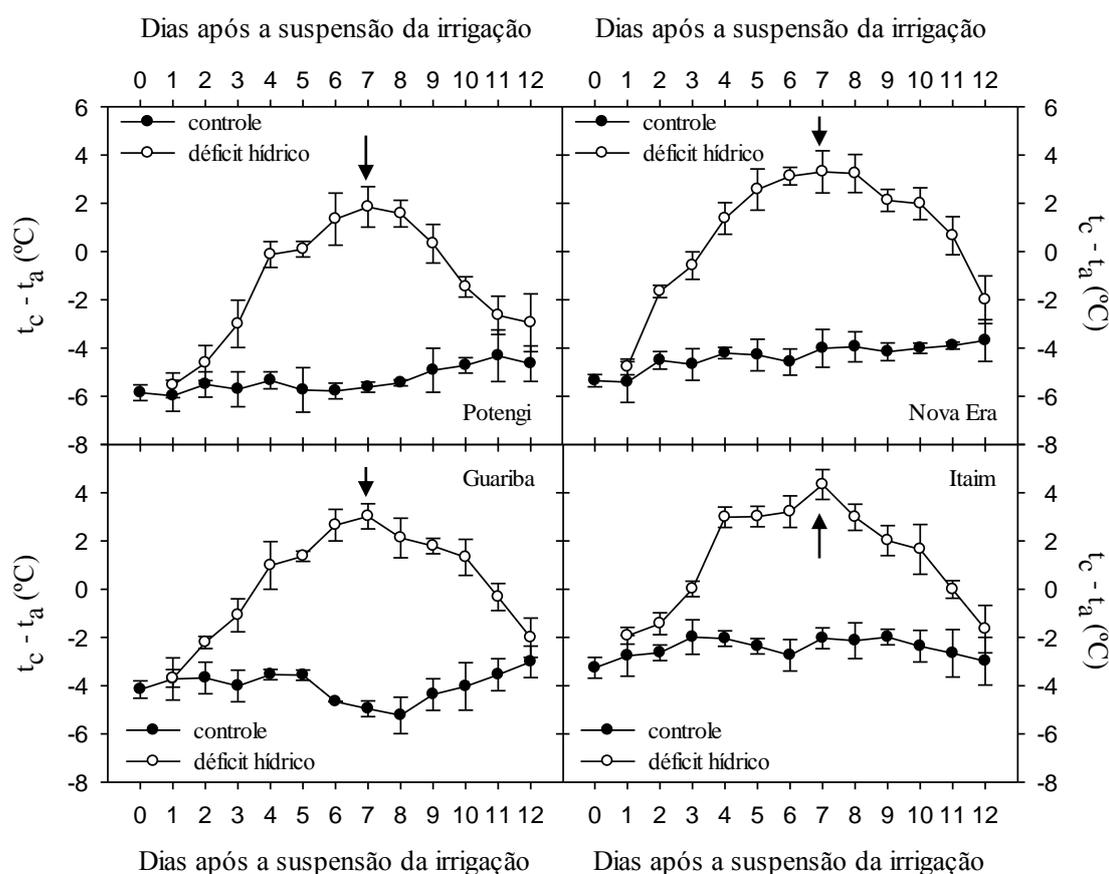


FIGURA 2. Diferença entre a temperatura foliar e a temperatura ambiente (t_c-t_a) de cultivares de feijão-caupi na ausência e presença de déficit hídrico. As setas indicam a retomada da irrigação e as barras os desvios padrão das médias.

Em condições de estresse hídrico, observa-se nas plantas de feijão-caupi alterações na orientação dos folíolos, de modo a reduzir a interceptação da radiação solar. Assim, em condições de estresse hídrico, as diferenças entre temperatura foliar e do ambiente em plantas de feijão-caupi são menores que as encontradas em

culturas como a da cana-de-açúcar, por exemplo, em que plantas sob déficit hídrico apresentam temperaturas até 6,6°C superiores à temperatura do ar (ISMAIL et al., 1994; TAIZ e ZEIGER, 2009).

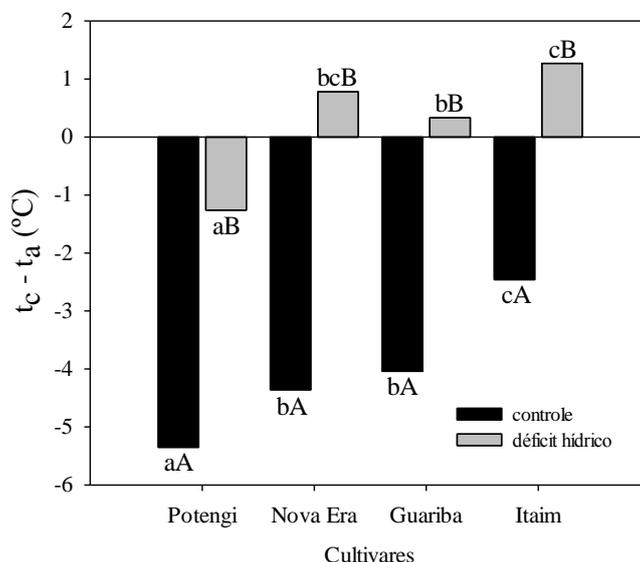


FIGURA 3. Diferença entre a temperatura foliar e a temperatura ambiente ($t_c - t_a$) médias de cultivares de feijão-caupi na ausência e presença de déficit hídrico. As letras, minúsculas em um mesmo status hídrico e maiúsculas em uma mesma cultivar, indicam as diferenças entre as médias pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade.

Na ausência de estresse hídrico, a temperatura foliar das plantas de feijão-caupi acompanhou as oscilações do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar e da radiação solar global (Figura 4). Embora níveis mais elevados de déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar resultem em um grande resfriamento evaporativo, pois os estômatos estão abertos devido à disponibilidade de água para o processo de transpiração, altos valores de radiação solar, inevitavelmente, promovem aumento na temperatura foliar (NEPOMUCENO et al., 2001; NASCIMENTO et al., 2011).

A radiação solar global e o déficit da pressão de saturação de vapor no ar possuem efeitos opostos sobre a diferença de temperatura entre o ar e a cultura na ausência de déficit hídrico, indicado pelos sinais dos coeficientes de regressão (Figura 5). As inclinações das linhas-base são bastante semelhantes, indicando que, em média, a temperatura foliar reduz cerca de 3°C com o aumento correspondente de 1 kPa no valor de déficit da pressão de saturação de vapor no ar. Em contrapartida, a

temperatura foliar é elevada em aproximadamente $1,0^{\circ}\text{C}$ para cada incremento de 100 W m^{-2} na radiação solar global.

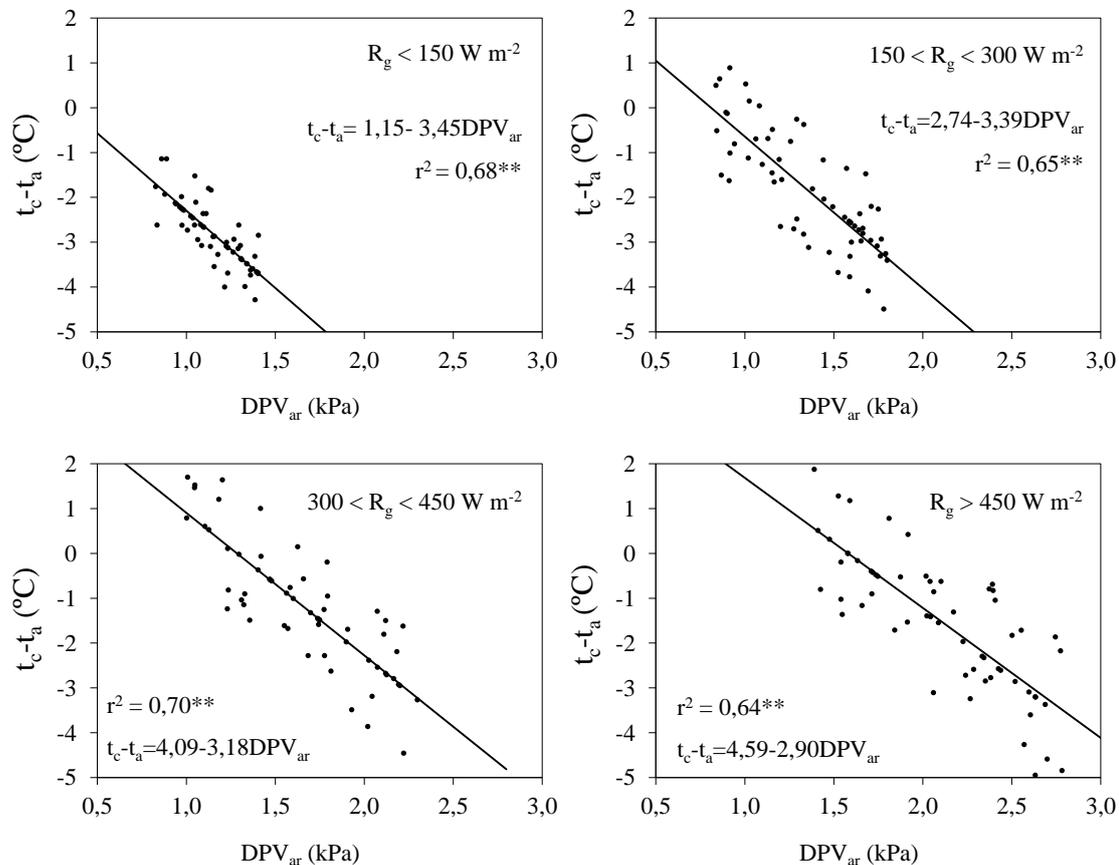


FIGURA 4. Relações entre a temperatura foliar e a temperatura ambiente ($t_c - t_a$) e o déficit da pressão de saturação de vapor no ar (DPV_{ar}), para a cultura do feijão-caupi em função do déficit da pressão de saturação de vapor no ar, na ausência de déficit hídrico e em diferentes condições de radiação solar global (R_g).

Não foram observados efeitos significativos da radiação solar global e do déficit da pressão de saturação de vapor no ar na diferença entre temperatura foliar e ambiente das plantas de feijão-caupi sob déficit hídrico. Em condições de estresse hídrico, a água se torna limitante, mesmo nos períodos do dia quando a demanda evaporativa do ambiente é menor, ou seja, com baixo déficit da pressão de saturação de vapor no ar (INMAN-BAMBER e SMITH, 2005). Com isso, a condutância estomática é reduzida e a temperatura foliar irá acompanhar as variações da temperatura do ar (LARCHER, 2006).

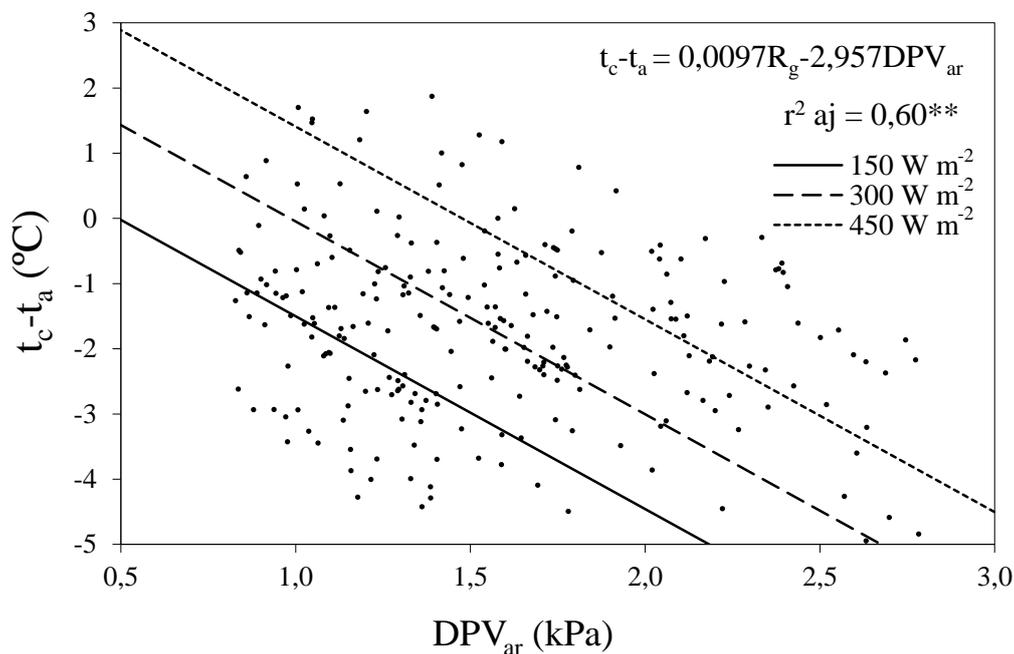


FIGURA 5. Diferenças entre a temperatura foliar e a temperatura ambiente ($t_c - t_a$) em função do déficit da pressão de saturação de vapor no ar (DPV_{ar}) e da radiação solar global (R_g) na cultura do feijão-caupi sob ausência de déficit hídrico.

Desta forma, a linha-base superior para o índice de estresse hídrico da cultura do feijão-caupi foi estabelecida a partir do valor médio das diferenças de temperaturas para valores de radiação solar global superior a 450 W m^{-2} , que foi de $3,1^\circ\text{C}$. A linha-base inferior, sob ausência de estresse hídrico, é geralmente determinada nos horários próximos ao meio-dia, quando em dias sem nebulosidade, a radiação solar atinge os valores máximos, e, deste modo, a diferença entre temperatura foliar e ambiente passa a ser função exclusiva do déficit da pressão de saturação de vapor no ar. Assim, a linha-base inferior foi obtida pela equação de regressão com a radiação solar global superior a 450 W m^{-2} (Figura 4).

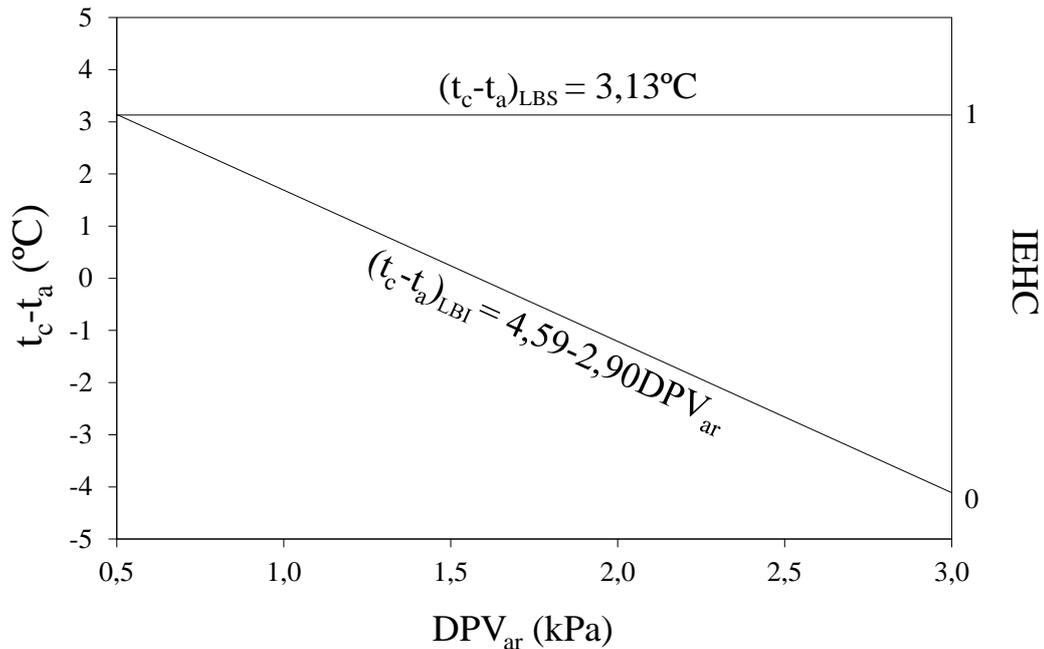


FIGURA 6. Representação gráfica do domínio da diferença de temperatura foliar e ambiente ($t_c - t_a$) em função do déficit da pressão de saturação de vapor no ar (DPV_{ar}).

A partir das linhas bases inferior e superior a disponibilidade de água para a cultura foi estimada por meio da normalização do domínio da diferença entre temperatura foliar e ambiente em condições de ausência e presença de déficit hídrico (JACKSON et al., 1981). A normalização para a cultura do feijão-caupi foi definida de acordo com a seguinte fórmula:

$$IEHC = \frac{(t_c - t_a) - [4,59 - 2,90DPV_{ar}]}{3,13 - [4,59 - 2,90DPV_{ar}]}$$

em que $(t_c - t_a)$ é a diferença entre as temperaturas foliar e do ar, em °C, e DPV_{ar} é o déficit da pressão de saturação de vapor no ar, em kPa. Deve-se salientar, no entanto, que este índice de estresse hídrico da cultura do feijão-caupi é válido apenas para situações em que a radiação solar global é superior a 450 W m^{-2} .

Os valores do índice de estresse hídrico da cultura variam entre 0 e 1, sendo igual a zero quando o estresse é nulo, ou seja, quando a planta transpira em sua taxa potencial; e igual a um quando o estresse é máximo, isto é, a transpiração é nula (Figura 6).

Ao longo do dia é possível observar alterações na posição da linha-base inferior, sendo estas alterações dependentes da radiação solar incidente no momento. Isto resulta em mudanças nos valores do índice de estresse hídrico da cultura do feijão-caupi. Para o cálculo deste índice em diferentes condições do período diurno, existe a necessidade de uma linha-base inferior para diferentes níveis de radiação solar incidente, representada pela equação de regressão linear múltipla expressa na Figura 5. Desta forma, o índice de estresse hídrico da cultura do feijão-caupi para diferentes níveis de radiação solar incidente (Figura 7) é dado por:

$$\text{IEHC} = \frac{(t_c - t_a) - [0,0097R_g - 2,957\text{DPV}_{\text{ar}}]}{3,13 - [0,0097R_g - 2,957\text{DPV}_{\text{ar}}]}$$

em que $(t_c - t_a)$ é a diferença entre as temperaturas foliar e do ar, em $^{\circ}\text{C}$; R_g , radiação solar global, em Wm^{-2} ; e DPV_{ar} , déficit da pressão de saturação de vapor no ar, em kPa.

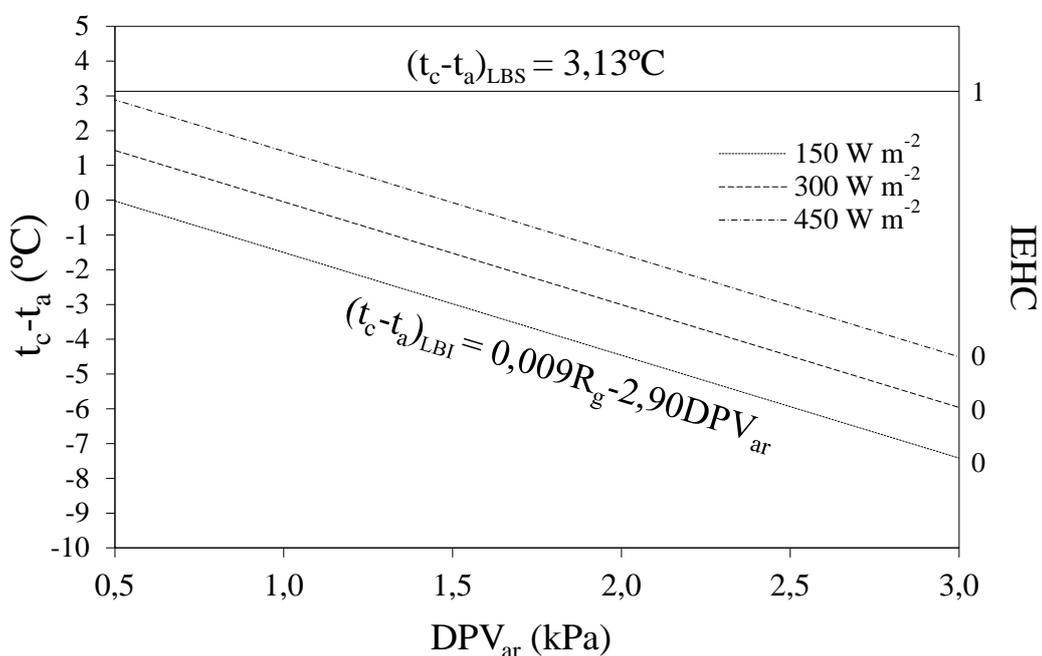


FIGURA 7. Representação gráfica do domínio da diferença de temperatura foliar e ambiente ($t_c - t_a$) em função do déficit da pressão de saturação de vapor no ar (DPV_{ar}), para três níveis de radiação solar global incidente (R_g).

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos e nas condições em que o experimento foi realizado, pode-se concluir que a termometria por infravermelho pode ser utilizada para estimar indiretamente a disponibilidade hídrica no solo em plantas de feijão-caupi, com base na diferença entre temperatura foliar e do ar; e que o modelo de índice de estresse hídrico para a cultura do feijão-caupi deve levar em consideração, além da diferença entre temperatura foliar e temperatura do ar, o déficit da pressão de saturação de vapor no ar e a radiação solar global incidente.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GONTIA, N.K.; TIWARI, K.N. Development of crop water stress index of wheat crop for scheduling irrigation using infrared thermometry. **Agricultural Water Management**, v.95, p.1.144-1.152, 2008.

IDSO, S.B.; JACKSON, R.D.; PINTER JUNIOR, P.J.; REGINATO, R.J.; HATFIELD, J.L. Normalizing the stress degree day parameter for environmental variability. **Agricultural Meteorology**, v.24, p.45-55, 1981.

INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v.92, p.185-202, 2005.

ISMAIL, A.M.; HALL, A.E.; BRAY, E.A. Drought and pot size effects on transpiration efficiency and carbon isotope discrimination of a cowpea accessions and hybrids. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.21, p.23-35, 1994.

JACKSON, R.D.; IDSO, S.B.; REGINATO, R.J.; PINTER JUNIOR, R.J. Canopy temperature as crop water stress indicator. **Water Resources Research**, v.17, p.1133-1138, 1981.

JARVIS, P.G. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. **Philosophical Transactions of the Royal Society: Biological Sciences**, v.273, p.593-610, 1976.

JONES, H.G. Stomatal control of photosynthesis and transpiration. **Journal of Experimental Botany**, v.49, p.387-398, 1998.

JUNG, P.K.; SCOTT, H.D. Leaf water potential, stomatal resistance, and relations in field-grown soybean. **Agronomy Journal**, v.72, p.986-990, 1980.

KIRKHAN, M.B. **Principles of soil and water plant relations**. Elsevier Academic Press, 2004. 500p.

LANDSBERG, J.J. **Physiological Ecology of Forest Production**. Orlando: Academic Press, 1986. 198p.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RIMA Artes e Textos, 2006. 532p.

LINHARES, L.C.F. **Comportamento de três cultivares de caupi, submetidos à omissão de nutrientes, cultivados em amostras de Gleissolo de várzea do rio Pará**. Belém: UFRA, 2007. 58 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Mestrado em Agronomia, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2007.

LUDLOW, M.M.; MUCHOW, R.C. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water limited environments. **Advances in Agronomy**, v.43, p.107-153, 1990.

McDERMIT, D.K. Sources of error in the estimation of stomatal conductance and transpiration from porometer data. **HortScience**, v.25, n.12, p.1538-48, 1990.

NASCIMENTO, S.P.; BASTOS, E.A.; ARAUJO, E.C.E.; FREIRE FILHO, F.R.; EVERALDO, M.S. Tolerância ao déficit hídrico em genótipos de feijão-caupi. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.853-860, 2011.

NEPOMUCENO, A.L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J.R.B.; OYA, T. Tolerância à seca em plantas: Mecanismos fisiológicos e moleculares. **Revista Biotecnologia, Ciência & Desenvolvimento**, n.23, p.12-18, 2001.

NOGUEIRA, R.J.M.C.; SANTOS, R.C. dos; BEZERRA NETO, E.; SANTOS, V. F. dos. Comportamento fisiológico de dois cultivares de amendoim submetidos a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, p.1963-1969, 1998.

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

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

SANMARTIN, J.P.; ACEVEDO, E. **Temperatura de canopia, CWSI e rendimento en genotipos de trigo**. 2001. 58 p. Laboratorio de Relación Suelo-Água-Planta. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto. Alegre: Artmed, 2009. 819p.

WANG, D.; GARTUNG, J. Infrared canopy temperature of early-ripening peach trees under postharvest deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, v.97, p.1787-1794, 2010.

CAPÍTULO III - VALIDAÇÃO DE UM ÍNDICE DE ESTRESSE HÍDRICO PARA A CULTURA DO FEIJÃO-CAUPI BASEADO NA TEMOMETRIA POR INFRAVERMELHO

RESUMO. Objetivou-se neste trabalho validar um índice de estresse hídrico para a cultura do feijão-caupi em condições de campo. Para isso foram realizados dois experimentos, um em condições controladas, para a criação da fórmula do índice de estresse hídrico; e outra em condições de campo, para a validação da fórmula. Ambos os experimentos foram realizados com quatro cultivares de feijão-caupi (BRS Potengi, BRS Nova Era, BRS Guariba e BRS Itaim). No experimento a campo, a condutância estomática, a transpiração, a concentração intercelular de carbono, a taxa fotossintética, a diferença entre as temperatura foliar e do ar, e o índice de estresse hídrico da cultura foram determinados em um período de estiação de quinze dias após a precipitação pluvial, com leituras aos 38, 43, 48 e 53 dias após a semeadura. Com base nos resultados encontrados pode-se concluir que a fórmula proposta para o índice de estresse hídrico da cultura do feijão caupi é válida para a aferição indireta das condições hídricas das plantas.

Palavras-chave: temperatura foliar, termometria por infravermelho, fechamento estomático, *Vigna unguiculata*

VALIDATION OF A CROP WATER STRESS INDEX TO COWPEA BASED ON INFRARED THERMOMETRY

ABSTRACT. The objective of this study was to validate a crop water stress index to cowpea in field conditions. For this two experiments were conducted, one under controlled conditions for the creation of index formula of water stress, and other conditions in the field, for the validation of the formula. Both experiments were conducted with four cultivars of cowpea (BRS Potengi, BRS Nova Era, BRS Guariba e BRS Itaim). In the field experiment, stomatal conductance, transpiration, intercellular carbon concentration, photosynthetic rate, the difference between leaf temperature and donate, and the index of crop water stress was determined in a dry period of fifteen days after a rainfall rain, with readings at 38, 43, 48 and 53 days after sowing. Based on these results it can be concluded that the proposed formula for the index of crop water stress of cowpea is valid for indirect measurement of plant water conditions.

Keywords: leaf temperature, infrared thermometry, stomatal closure, *Vigna unguiculata*

1. INTRODUÇÃO

A água desempenha um papel fundamental na vida das plantas. Sua participação é imprescindível nas reações enzimáticas, na solubilização e transporte de solutos, na digestão hidrolítica, entre outras etapas do metabolismo vegetal. Para cada grama de matéria orgânica produzida pela planta, aproximadamente 500 g de água são absorvidos pelas raízes, transportados pelos tecidos e perdidos para a atmosfera na forma de vapor (BRODRIBB e HOLBROOK, 2003; TAIZ e ZEIGER, 2009). Mesmo um pequeno desequilíbrio nesse fluxo de água pode causar déficits hídricos e diferenças em inúmeros processos celulares, enzimáticos e metabólicos (CALBO e MORAES, 2000; CHAVES et al., 2002).

Assim, quando expostas a situações de déficit hídrico, as plantas exibem uma grande variedade de respostas moleculares e celulares, atingindo praticamente todo aspecto da fisiologia e do metabolismo da planta (FLOWERS et al., 2004; XIONG e ZHU, 2002). Estas estratégias de tolerância ao déficit hídrico podem ser agrupadas em mecanismos de tolerância com a manutenção da turgescência, mecanismos de tolerância sob baixa turgescência e mecanismos de escape da seca (TURNER, 1986; PIMENTEL, 2004).

Entre as plantas que toleram o estresse hídrico com a manutenção de alto conteúdo de água, destaca-se o feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), uma planta frequentemente cultivada em regiões com condições ambientais adversas, que possui a habilidade de manter alta hidratação durante um período de alta demanda evaporativa ou de déficit hídrico no solo, a partir da restrição da perda de água, por meio da redução na condutância estomática e na redução da radiação absorvida (JONES et al., 1981; CHAVES et al., 2002). A redução na condutância estomática em condições de déficit hídrico, entretanto, além de resultar no declínio da taxa fotossintética (MAHAJAN e TUTEJA, 2005), devido à menor difusão de CO₂ para o interior da folha, ocasiona uma diminuição na perda de calor latente da folha pela transpiração e, conseqüentemente, no aumento da temperatura foliar (OLIVEIRA et al., 2005).

A manutenção da temperatura foliar igual ou ligeiramente inferior à temperatura do ar comprova a capacidade de refrigeração das plantas, via transpiração, no intuito de manter a planta protegida dos danos por temperaturas elevadas. Esse é um comportamento desejável, observado em várias espécies

vegetais, incluindo o feijão-caupi (LUDLOW e MUCHOW, 1990; ISMAIL et al., 1994). Desta forma, em condições de déficit hídrico, a relação entre temperatura foliar e temperatura do ar pode ser utilizada como indicador da condição hídrica da planta no manejo da irrigação, na seleção de genótipos tolerantes e em pesquisas sobre fisiologia do estresse em plantas (LARCHER, 2006).

Alguns modelos, baseados na temperatura do dossel vegetativo obtida por termometria a infravermelho foram desenvolvidos como indicadores do estresse hídrico das culturas. O Índice de Estresse Hídrico da Cultura (IEHC) se baseia na correlação entre a diferença da temperatura foliar e do ar, o déficit de pressão de saturação de vapor no ar e a radiação solar incidente, que resulta em relações lineares múltiplas (IDSO et al., 1981; JACKSON et al., 1981). Entretanto, existem muitos relatos sobre as dificuldades em determinar o IEHC em regiões tropicais, onde a elevada umidade do ar e as frequentes variações na velocidade do ar e na radiação solar incidente podem gerar imprecisão no cálculo do IEHC (TRENTIN, 2010).

Neste sentido, objetivou-se neste trabalho validar um índice de estresse hídrico para a cultura do feijão-caupi em condições de campo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para a determinação da fórmula do Índice de Estresse Hídrico da Cultura (IEHC) foi realizado um experimento preliminar, em casa de vegetação não climatizada localizada na Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), em Dourados, MS, Brasil, com quatro cultivares de feijão-caupi (BRS Potengi, BRS Nova Era, BRS Guariba e BRS Itaim), cultivados em vasos com capacidade de 5 L, preenchidos com solo e mantido a 80% da capacidade de campo.

Quarenta dias após a semeadura, a irrigação foi suspensa em metade dos vasos e após sete dias de suspensão da irrigação foram realizadas leituras de temperatura foliar, por meio de um termômetro a infravermelho; temperatura e umidade do ar, obtidas com um termômetro/higrômetro digital portátil e radiação solar incidente, determinada pela estação meteorológica da UFGD.

Com base nas relações entre diferença de temperatura entre o dossel e o ar, déficit de pressão de saturação de vapor no ar e radiação solar incidente em

condições de ausência e presença de déficit hídrico severo, foi estabelecida a seguinte fórmula de IEHC para a cultura do feijão-caupi (NUNES, 2012), de acordo com a metodologia proposta por Idso et al. (1981) e adaptada por Jackson et al. (1981):

$$\text{IEHC} = \frac{(t_c - t_a) - [0,0097R_g - 2,957\text{DPV}_{\text{ar}}]}{3,13 - [0,0097R_g - 2,957\text{DPV}_{\text{ar}}]}$$

em que $(t_c - t_a)$ é a diferença entre as temperaturas foliar e do ar, em C; R_g , radiação solar global, em Wm^{-2} ; e DPV_{ar} , déficit da pressão de saturação de vapor no ar, em kPa.

Para a validação do modelo proposto no ensaio preliminar, foi realizado um experimento a campo na área experimental da Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados, MS, Brasil, em um Latossolo Vermelho distroférico de textura argilosa, nas coordenadas de 22°13' S e 54°48' W, a 400 m de altitude, com semeadura em 24 de março de 2011, em área de plantio direto.

O clima da região sul de Mato Grosso do Sul, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwa, com verões quentes e invernos secos, temperaturas máximas observadas entre os meses de dezembro e janeiro e temperaturas mínimas entre maio e agosto, coincidindo com a chuva excedente na primavera-verão e déficit hídrico no outono-inverno (FIETZ e FISCH, 2008).

O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso, com quatro cultivares de feijão-caupi (BRS Potengi, BRS Nova Era, BRS Guariba e BRS Itaim) e três repetições. As parcelas foram constituídas de 4 linhas com 8 metros e espaçamento entrelinhas de 0,45 m, com uma população de 180 mil plantas por hectare.

As avaliações de condutância estomática (g_s , $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), taxa transpiratória (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), concentração de carbono intercelular, (C_i , mmol mol^{-1}) e taxa fotossintética por unidade de área foliar (A , $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) foram realizadas aos 38, 43, 48 e 53 dias após a semeadura, utilizando-se um analisador de gases no infravermelho (IRGA), modelo LCi/LCpro (ADC Bioscientific Ltd, Hoddesdon, UK). As leituras foram realizadas no período da manhã, entre 9h e 11h, amostrando-se o segundo trifólio completamente expandido a partir do ápice. Nos três dias

anteriores à primeira leitura ocorreram precipitações pluviais, acumuladas em 44 mm. Após estas precipitações houve um período de estiagem de quarenta dias, dentro do qual foram realizadas as avaliações.

A temperatura foliar foi obtida nas mesmas épocas das leituras de trocas gasosas e taxa fotossintética, entre 9 e 15h, a partir do posicionamento de um termômetro a infravermelho (modelo MiniTemp MT4, Raytek, Santa Cruz, CA, USA) em três pontos distintos da superfície foliar, a uma distância de cerca de 5 cm. O termômetro a infravermelho apresentava um campo de visada de 15° e estava equipado com um filtro espectral na faixa de 8 a 14 μm , com exatidão de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. A temperatura ambiente e umidade relativa do ar foram determinadas por um termômetro/higrômetro digital portátil com precisão de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ e 1%. Os dados de radiação solar incidente foram obtidos na estação meteorológica da Embrapa Agropecuária Oeste.

O déficit da pressão de saturação de vapor no ar (DPV_{ar} , em kPa) foi calculado por meio do método de Penman-Monteith FAO (PM-FAO) e os procedimentos sugeridos pelo boletim da FAO N° 56, calculado por:

$$\text{DPV}_{\text{ar}} = e_s - e_a$$

em que DPV_{ar} = déficit da pressão de saturação de vapor no ar, em kPa; e_s = pressão de saturação de vapor, em kPa; e e_a = pressão parcial de vapor, em kPa.

A pressão de saturação de vapor foi calculada pela fórmula:

$$e_s = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27T}{T + 237,3}\right)$$

em que e_s = pressão de saturação de vapor, em kPa; T = temperatura, em °C.

A pressão parcial de vapor foi calculada por meio da seguinte fórmula:

$$e_a = e_s \cdot \left(\frac{\text{UR}}{100}\right)$$

em que e_a = pressão parcial de vapor, em kPa; e_s = pressão de saturação de vapor, em kPa; e UR é a umidade relativa do ar, em %.

As condições climáticas durante o período de leituras eram de ventos com velocidades menores que $1,5 \text{ m s}^{-1}$, déficit de pressão de saturação de vapor no ar de 0,33;1,54; 0,87 e 0,87 kPa; e radiação solar incidente de 63, 326, 139 e 101 W m^{-2} aos 38, 43, 48 e 53 dias após a semeadura, respectivamente.

Os gráficos foram elaborados com o auxílio do software estatístico SigmaPlot, versão 12.2. Os dados foram submetidos à análise de variância pelo Teste F e as diferenças entre as cultivares foram comparadas pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A condutância estomática teve redução média de aproximadamente 22% ao longo dos 16 dias após a última precipitação pluvial (Figura 1), sendo a menor redução na condutância estomática observada na cultivar Potengi (17,6%), enquanto as outras cultivares apresentaram reduções entre 20 e 23%.

A restrição da perda de água por meio do fechamento dos estômatos é um mecanismo importante para manter a turgescência positiva, o crescimento e a sobrevivência das plantas (NGUGI et al., 2004). Assim, a condutância estomática representa um atributo de estado chave para predizer o uso da água e a fotossíntese líquida e, portanto, a eficiência de uso da radiação e da produtividade primária líquida (KATUL et al., 2000; MACFARLANE et al., 2004).

O fechamento dos estômatos em função da menor disponibilidade hídrica no solo resultou na redução da transpiração das quatro cultivares de feijão-caupi avaliadas, com uma redução média de 28% (Figura 1). Na ausência de restrição hídrica, a diferença de pressão de vapor entre a folha e o ar é a força que guia a transpiração (TAIZ e ZEIGER, 2009). As mudanças na condutância estomática regulam a perda de água, portanto ajustam a transpiração a níveis compatíveis com o suprimento de água no solo (FRANCO e LÜTTGE, 2002).

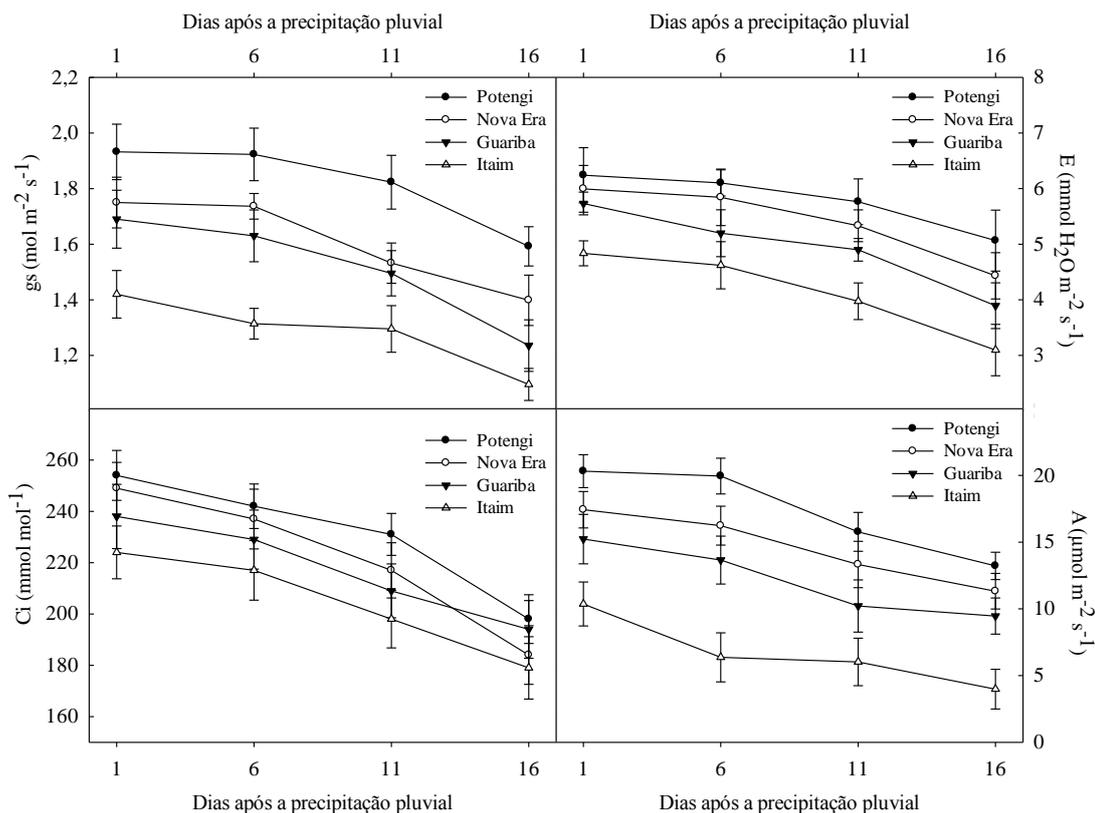


FIGURA 1. Condutância estomática (gs), transpiração (E), concentração de carbono intercelular (C_i) e taxa fotossintética (A) de quatro cultivares de feijão-caupi em função dos dias após a precipitação pluvial. As barras representam os desvios padrão das médias.

A ausência de precipitações pluviais e a diminuição da abertura estomática reduziram em média a concentração intercelular de carbono em 22%, durante a primeira quinzena (Figura 1), com valores bem próximos entre as cultivares. Sob condições de menor disponibilidade hídrica, tem sido demonstrada a relação direta entre o fechamento estomático e a redução da concentração intercelular de CO_2 , gerando decréscimos na assimilação do CO_2 e, conseqüentemente, redução na produção de matéria seca (OLIVEIRA et al., 2005).

Em conseqüência da menor condutância estomática e da menor concentração de carbono intercelular, a taxa fotossintética diminuiu cerca de 40%, na média entre as cultivares (Figura 1). As taxas fotossintéticas dependem de inúmeras condições ambientais, como radiação, temperatura, umidade e concentração de CO_2 . Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que o fechamento estomático representou a causa primária da redução na taxa fotossintética, e que essa redução ocorreu devido à diminuição na disponibilidade de CO_2 nos espaços intercelulares das folhas.

Na comparação entre as cultivares, a Potengi apresentou os maiores valores de trocas gasosas e, por isso, maiores valores de concentração de carbono intercelular e de taxas fotossintéticas (Figura 2). Vale destacar também a grande diferença entre as taxas fotossintéticas das cultivares Potengi e Itaim, provavelmente em virtude de diferenças em sua eficiência fotossintética.

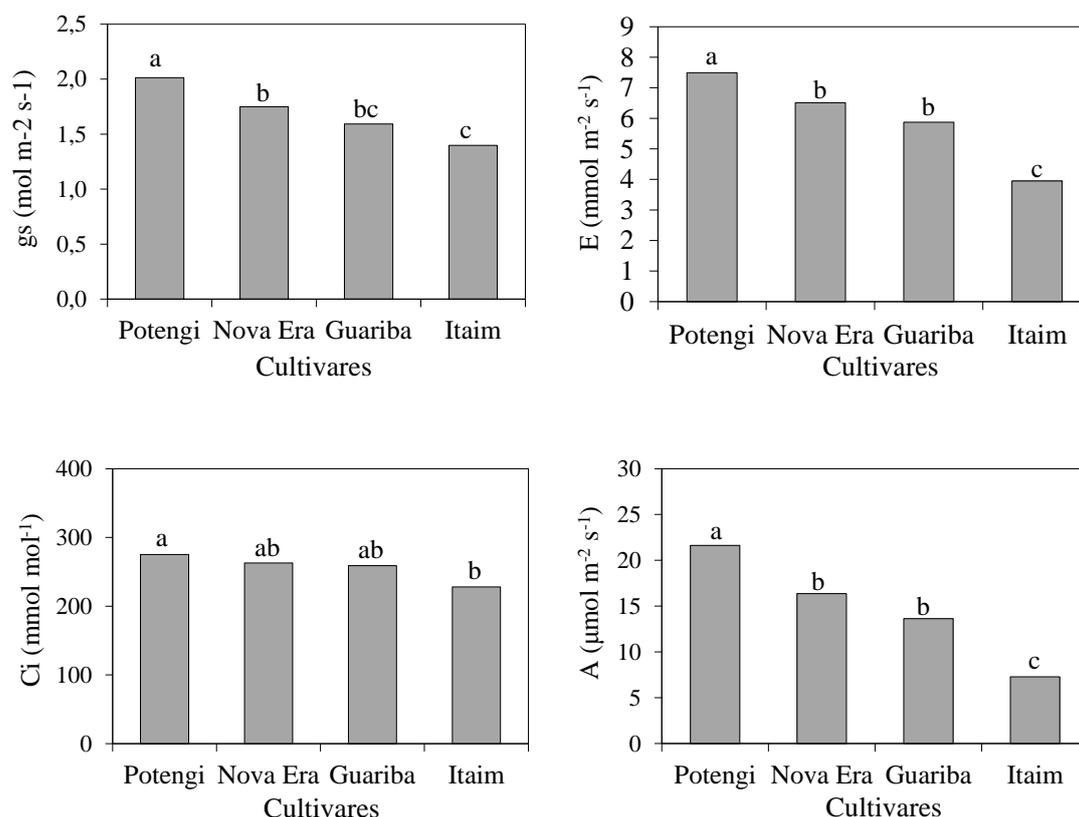


FIGURA 2. Condutância estomática (gs), transpiração (E), concentração de carbono intercelular (Ci) e taxa fotossintética (A) médias de quatro cultivares de feijão-caupi. Colunas com letras diferentes em um mesmo gráfico diferem entre si pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade.

Os valores da diferença de temperatura entre a superfície foliar e a atmosfera (Figura 3) possuem um padrão semelhante às respostas obtidas para resistência estomática e transpiração (Figura 1), constituindo, assim, um excelente parâmetro para aferição indireta das condições hídricas da planta. A diferença de temperatura foliar em plantas com e sem restrições hídricas se fundamenta no estado hídrico das plantas, no comportamento estomático e na perda de calor latente por meio da transpiração. Entretanto, esse processo pode variar entre espécies ou até mesmo

dentro de uma mesma espécie, conforme a intensidade e duração do estresse hídrico (INMAN-BAMBER e SMITH, 2005).

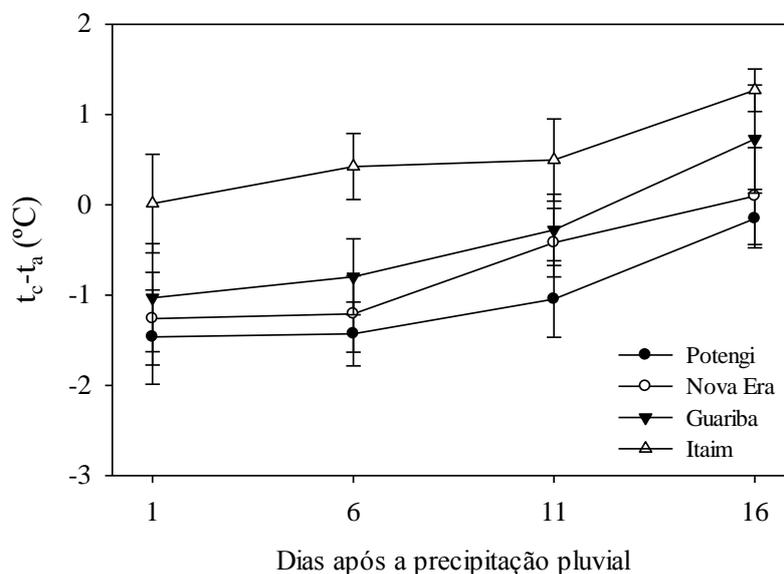


FIGURA 3. Diferenças entre temperatura foliar e temperatura do ar de quatro cultivares de feijão-caupi em função dos dias após a precipitação pluvial. As barras representam os desvios padrão das médias.

O índice de estresse hídrico para a cultura do feijão-caupi (IEHC) foi calculado a partir do modelo estabelecido em ensaio preliminar, sob condições controladas, em plantas de feijão-caupi cultivadas em solo com e sem restrições hídricas severas. Assim, a partir do modelo proposto e dos dados de temperatura foliar, temperatura do ar, déficit de pressão de saturação de vapor no ar e radiação solar incidente, foram calculados os índices de estresse hídrico ao longo da primeira quinzena após a última precipitação pluvial (Figura 4). O IEHC varia entre 0 e 1 (zero e um), onde o valor 0 (zero) representa a ausência de estresse hídrico e no valor 1 (um) as plantas encontram-se em estresse hídrico severo, próximo do ponto de murcha permanente (JACKSON et al., 1981). Desta forma, com o passar do tempo após a última precipitação pluvial, a menor disponibilidade hídrica no solo resultou em valores de IEHC maiores.

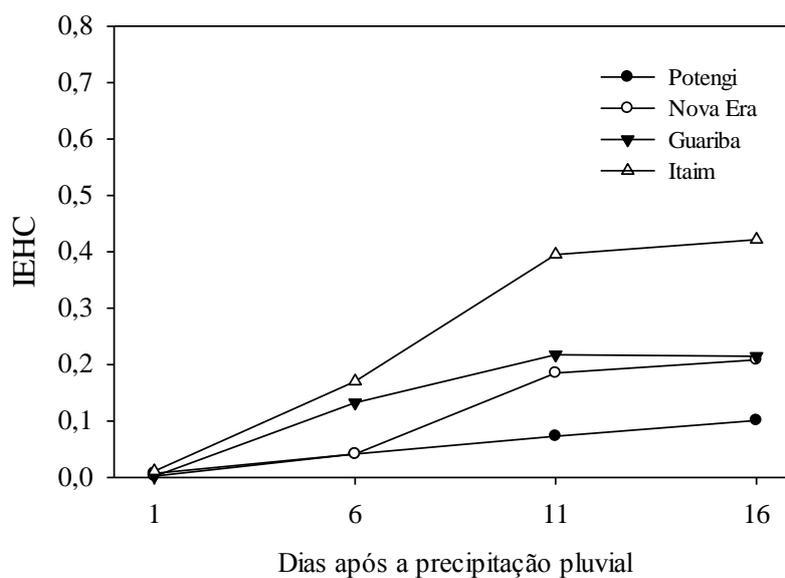


FIGURA 4. Índice de estresse hídrico de quatro cultivares de feijão-caupi em função dos dias após a precipitação pluvial.

Em relação aos valores de trocas gasosas, o índice de estresse hídrico proposto para a cultura do feijão-caupi apresentou uma correlação forte e significativa ($r = -0,8^{**}$) com a condutância estomática, validando-o assim como um indicador do status hídrico das plantas, por meio de uma metodologia simples, prática e de baixo custo.

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados encontrados, pode-se concluir que a fórmula proposta para o índice de estresse hídrico da cultura do feijão-caupi é válida para a aferição indireta das condições hídricas das plantas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRODRIBB, T.J.; HOLBROOK, N.M. Stomatal closure during leaf dehydration, correlation with other leaf physiological traits. **Plant Physiology**, v.132, p.2166-2173, 2003.
- CALBO, M.E.R.; MORAES, J.A.P.V. de. Efeitos da deficiência de água em plantas de *Euterpe oleracea* (açai). **Revista Brasileira de Botânica**, v.23, p.225-230, 2000.
- CHAVES, M.M.; PEREIRA, J.S.; MAROCO, J.; RODRIGUES, M.L.; RICARDO, C.P.P.; OSORIO, M.L.; CARVALHO, I.; FARIA, T.; PINHEIRO, C. How Plants Cope with Water Stress in the Field? Photosynthesis and Growth. **Annals of Botany**, v.89, p.907-916. 2002.
- FIETZ, C. R.; FISCH, C.R. **O clima da região de Dourados, MS**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2008.
- FLOWERS, T.J. Improving crop salt tolerance. **Journal of Experimental Botany**, v.55, p.307-319. 2004.
- FRANCO, A.C.; LÜTTGE, U. Midday depression in savanna trees: coordinated adjustments in photochemical efficiency, photorespiration, CO₂ assimilation and water use efficiency. **Oecologia**, v.131, p.356–365, 2002.
- IDSO, S.B.; JACKSON, R.D.; PINTER JUNIOR, P.J.; REGINATO, R.J.; HATFIELD, J.L. Normalizing the stress degree day parameter for environmental variability. **Agricultural Meteorology**, v.24, p.45-55, 1981.
- INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v.92, p.185-202, 2005.
- ISMAIL, A.M.; HALL, A.E. ; BRAY, E.A. Drought and pot size effects on transpiration efficiency and carbon isotope discrimination of a cowpea accessions and hybrids. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.21, p.23-35, 1994.
- JACKSON, R.D.; IDSO, S.B.; REGINATO, R.J.; PINTER JUNIOR, R.J. Canopy temperature as crop water stress indicator. **Water Resources Research**, v.17, p.1133-1138, 1981.
- JONES, M.M.; TURNER, N.C.; OSMOND, C. B. Mechanisms of Drought Resistance. In: PALEG, L.G.; ASPINALL, D. (Ed.). **The Physiology and Biochemistry of Drought Resistance in Plants**. Sydney: Academic Press, 1981. p.15-35.
- KATUL, G.G.; ELLSWORTH, D.S.; LAI, C.T. Modelling assimilation and intercellular CO₂ from measured conductance: a synthesis of approaches. **Plant, Cell and Environment**, v.23, p.1313–1328, 2000.

- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RIMA Artes e Textos, 2006. 532p.
- LUDLOW, M.M.; MUCHOW, R.C. A critical evaluation of traits for improving crop yields in waterlimited environments. **Advances in Agronomy**, v.43, p.107-53, 1990.
- MACFARLANE, C.; WHITE, D.A.; ADAMS, M.A. The apparent feed-forward response to vapour pressure deficit of stomata in droughted, field-grown *Eucalyptus globulus* Labill. **Plant, Cell and Environment**, v.27, p.1268-1280, 2004.
- MAHAJAN, S.; TUTEJA, N. Cold, salinity and drought stresses: An overview. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v.444, p.139-158. 2005.
- NGUGI, M.R.; HUNT, D.D.; DOLEY, D.; RYAN, P.; DART, P. Selection of species and provenances for low-rainfall areas: physiological responses of *Eucalyptus cloeziana* and *Eucalyptus argophloia* to seasonal conditions in subtropical Queensland. **Forest Ecology and Management**, v.193, p.141-156, 2004.
- NUNES, A.S. **Termometria por infravermelho como indicador de estresse hídrico em planas de feijão-caupi**. 2012. 61f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2012.
- OLIVEIRA, A.D.; FERNANDES, J.E.; RODRIGUES, T.J.D. Condutância estomática como indicador de estresse hídrico em feijão. **Engenharia Agrícola**, v.25, p.86-95, 2005.
- PIMENTEL, C. **A Relação da Planta com a Água**. Seropédica - RJ: Editora da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2004. 191 p.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto. Alegre: Artmed, 2009. 819p.
- TRENTIN, R. **Estimativa de um índice de estresse hídrico para a cultura da cana-de-açúcar com base na temperatura foliar**. 2010. 61f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.
- TURNER, N.C. Adaptation to water deficits: a changing perspective. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.43, p.175-190. 1986.
- XIONG,L.; ZHU, J.K. Molecular and genetic aspects of plant responses to osmotic stress. **Plant Cell Environment**, v.25, p.131-139. 2002.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A determinação do estresse hídrico em plantas possui uma série de aplicações na Agronomia, que vão desde a seleção de genótipos tolerantes até o correto manejo da irrigação. Além disso, os indicadores de estresse hídrico são de grande importância para os estudos das respostas das plantas às condições ambientais adversas.

Medidas remotas da temperatura do dossel de plantas, tomadas na banda do infravermelho termal, fornecem um método eficiente para o monitoramento rápido e de uma forma não destrutiva da resposta da planta inteira ao estresse hídrico. Assim, a termometria por infravermelho pode ser utilizada em conjunto com um sistema de posicionamento global diferencial (DGPS) para a espacialização do índice de estresse hídrico da cultura (IEHC) com o intuito de integrar os dados do status hídrico do solo, altimetria da área e produtividade de grãos a um sistema de informação geográfica (SIG).

No campo da agricultura de precisão, a geração de mapas georeferenciados com valores de índice de estresse hídrico da cultura, baseado na termometria por infravermelho, pode auxiliar no manejo dos tratos culturais ou na análise da produtividade das culturas.

A cultura do feijão-caupi possui mecanismos interessantes de tolerância ao estresse hídrico. Entre estas respostas, além do controle da abertura estomática, pode-se destacar o aumento na eficiência instantânea do uso da água, provavelmente em decorrência de uma maior condutividade hidráulica das raízes.