

## USO DA TERMOMETRIA A INFRAVERMELHO NA FENOTIPAGEM PARA TOLERÂNCIA À SECA DE CEREAIS E LEGUMES

Reinaldo Lúcio Gomide<sup>1</sup>

**ABSTRACT: Infrared Thermometry Use for Drought Tolerance Phenotyping of Cereals and Legumes-** Remotely-sensed infrared crop canopy temperature ( $T_c$ ) measurements provide an efficient method for rapid, non-destructive monitoring of the whole-plant response to water stress. With the advent of portable infrared radiation thermometers (IRT's), the concept of using  $T_c$  measurements to infer water stress and transpirational rates of genotypes has been advanced and received some interest as a drought-tolerance screening technique for research purposes. A crop water stress index (CWSI) was developed by Jackson (1982) using the rational basis for relating plants water stress and  $T_c$  by means of the Monteith (1973) and the surface energy balance equations. The infrared technology has improved to the point that light weight (about 1kg) hand-held instruments, accurate to  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ , are available on the market. Today, some IRT's sensors can be equipped with dedicated microprocessors that translate  $T_c$  measurements and ambient weather conditions directly into CWSI. However, it is important that these sensors be selected to operate under crop condition. This means that they should meet the following specifications: low temperature range readings (ideally up to  $80^\circ\text{C}$ ), 8–14 mm band wave length, and emissivity set to 0.98 (for most crops). There are at least two main situations in which  $T_c$  measurements might best be used in screening for drought tolerance. The first involves leaf temperature traits that are measured under low soil moisture (water stressed) conditions, where plants showing a cooler  $T_c$  are transpiring at higher rates and, hence, are capable of relatively high rates of photosynthesis and growth and higher yields. The second situation can occur in genotypes that exhibit a warmer  $T_c$  under well-watered conditions. This would indicate greater drought resistance, based on the reasoning that plants with a higher  $T_c$  transpire less, thus saving soil water for growth and reproductive effort later in the season.

Keywords: remote sensing, canopy temperature, crop water stress index, genotype screening.

**RESUMO:** Medidas remotas da temperatura do dossel de plantas ( $T_c$ ), 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. Com o advento de termômetros de radiação a infravermelho portáteis (IRT's), o conceito de usar medições de  $T_c$  para inferir sobre o estresse hídrico e as taxas de transpiração de genótipos tem avançado e recebido importância como uma técnica de seleção para tolerância à seca, com fins de investigação. Um índice de estresse hídrico de cultura (IEHC) foi desenvolvido por Jackson (1982), utilizando a base racional para relacionar o estresse hídrico

<sup>1</sup> Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG. E-mail: gomide@cnpmembrapa.br

de plantas e a  $T_c$ , por meio das equações de Monteith (1973) e do balanço de energia da superfície. A tecnologia a infravermelho evoluiu a tal ponto que instrumentos portáteis de peso leve (cerca de 1 kg) estão disponíveis no mercado, com precisão de  $\pm 0,5$  °C. Hoje, alguns sensores de IRT 's podem ser equipados com microprocessadores dedicados, que traduzem medições de  $T_c$  e de condições climáticas do ambiente diretamente em IEHC. No entanto, é importante que estes sensores sejam selecionados para operar nas condições das culturas. Isso significa que eles devem possuir as seguintes especificações: leituras de baixa faixa de temperatura (ideal até 80 °C), comprimento de onda na banda de 8-14  $\mu\text{m}$  e emissividade ajustada para 0,98 (para a maioria das culturas). Há pelo menos duas principais situações em que as medições  $T_c$  poderiam ser bem utilizadas na seleção de genótipos para tolerância à seca. A primeira envolve as características da temperatura foliar que são medidas sob baixa condição de umidade do solo (com estresse hídrico), onde as plantas mostrando um  $T_c$  mais baixo (mais frio) estão transpirando a taxas mais elevadas e, portanto, são capazes de taxas relativamente elevadas de fotossíntese, crescimento e produção. A segunda situação pode ocorrer em genótipos que apresentam um maior valor de  $T_c$  (mais quente) sob condições bem irrigadas (sem estresse hídrico). Isto poderia indicar uma maior resistência à seca, com base no raciocínio de que as plantas com maior  $T_c$  transpiram menos, então poupando água no solo para ser usada no seu crescimento e mais tarde no ciclo na sua fase reprodutiva.

**Palavras chave:** sensoriamento remoto, temperatura do dossel, índice de estresse hídrico da cultura, seleção de genótipos.

### **Caracterização e Manejo de Estresse Hídrico**

Um dos problemas principais na fenotipagem de genótipos de plantas, cereais e legumes para a caracterização e manejo de estresse hídrico é a limitação e até mesmo a falta de conhecimento e experiência dos técnicos e engenheiros com os princípios básicos para operar e manejar adequadamente os sistemas de irrigação, de modo a garantir um ótimo controle da água de irrigação e uma caracterização precisa do regime da água de irrigação, que deve ser diferenciado nos sítios de fenotipagem para tolerância à seca. Devido a isso, é necessário um programa de treinamento em operação, avaliação e manejo de água de sistemas de irrigação em condições de campo, principalmente sob condições de limitação ou restrição hídrica.

A programação correta da irrigação no que diz respeito ao momento de aplicação da água nas quantidades adequadas é essencial quando o suprimento da água é limitado e a demanda evaporativa da atmosfera é alta. Portanto, decisões corretas devem ser tomadas com relação a essa programação, baseadas em informações e conhecimentos do sistema irrigado dos genótipos de plantas, do estágio de desenvolvimento desses genótipos e da previsão antecipada de redução de produção devido ao estresse hídrico induzido, bem como do registro em base contínua de dados de condições climáticas e de solo para se ter um registro de mudanças e variações ao longo do ciclo de crescimento das plantas (Jensen et al., 1990).

## Medições do Status de Água no Solo para Tolerância à Seca

A medição da água armazenada no perfil do solo, na profundidade efetiva do sistema radicular, e a determinação da capacidade de um determinado solo de armazenar água são importantes para a definição precisa do regime de irrigação de genótipos de plantas e conseqüentemente do controle da *disponibilidade de água no solo (DAS)* na região efetiva do sistema radicular.

Nos ensaios em campo de tolerância à seca, genótipos de plantas são submetidos a estresse hídrico, que pode ser imposto durante todo o ciclo das plantas ou apenas em determinados estádios de seu ciclo fenológico. O período de aplicação, a duração e a intensidade do estresse hídrico dependem da sensibilidade dos genótipos ao estresse e dos objetivos do estudo. No Brasil, para cultura do milho, cultivada no período de segundo cultivo ("safrinha"), o estresse é aplicado antes do início da floração. Já para a cultura do sorgo o estresse pode ser aplicado na floração. Geralmente, para as culturas que possam ser submetidas a períodos secos na fase inicial, o estresse pode ser aplicado antes da floração.

Simplesmente suspendendo o suprimento de água via irrigação não significa que os genótipos de plantas sofram estresse hídrico. A capacidade de retenção de água no solo varia de solo para solo e isso deve ser levado em consideração ao planejar um experimento de campo de tolerância à seca. Por outro lado, não é desejável que um determinado genótipo sofra de murcha permanente e morra. O nível de estresse que um determinado genótipo sofrerá depende da interação entre plantas nas fileiras de plantio, do tipo e profundidade de solo e também de condições climáticas. Portanto, é fundamental que algum tipo de monitoramento seja feito sobre esses três elementos. Monitoramento do conteúdo de água do solo e do estado hídrico da planta permite a quantificação e caracterização do nível de estresse hídrico e ajuda a tomar uma decisão sobre quando interromper a aplicação do estresse hídrico nos ensaios de campo.

## Medições da Necessidade e do Status de Água nas Plantas

A determinação da necessidade hídrica de genótipos de plantas, cereais e legumes, ou seja, evapotranspiração ( $ET_c$ ), é um processo combinado de transferência de água, na forma de vapor, a partir da superfície vegetativa para a atmosfera, incluindo a evaporação direta da superfície do solo e transpiração das plantas. Nesse processo de transferência de vapor d'água, elementos climáticos da atmosfera controlam a demanda de água, atuando como um dreno no contínuo solo-plantas-atmosfera.

A programação da irrigação deverá seguir a variação das necessidades de água dos genótipos de plantas, em diferentes ambientes, durante o ciclo fenológico das plantas, a fim de assegurar alta eficiência de uso de água e alta produção dos genótipos (Doorenbos e Kassam, 1979). Na maioria dos casos, o momento de aplicação da água de irrigação e a quantidade de água a aplicar estão diretamente relacionados.

A fim de determinar a  $ET_c$  dos genótipos de plantas é necessário obter em primeiro lugar a evapotranspiração potencial ( $ET_p$ ) ou evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) por meio da equação modificada e combinada de Penman-Monteith (Allen et al., 1998; Doorenbos e Pruitt, 1977; Smith et al., 1991):

$$ET_o = \frac{\delta}{\delta + \gamma} (R_n - G) \frac{1}{\lambda} + \frac{\gamma}{\delta + \gamma} \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)$$

Onde,  $ET_o$  é a evapotranspiração de referência de um genótipo hipotético (em  $\text{mm d}^{-1}$ ),  $R_n$  é o saldo de radiação (em  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $G$  é o fluxo de calor no solo (em  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $T$  é a temperatura do ar (em  $^{\circ}\text{C}$ ),  $U_2$  é a velocidade do vento a 2 m de altura (em  $\text{m s}^{-1}$ ),  $(e_a - e_d)$  é o déficit de pressão de vapor do ar (DPV; em kPa),  $\delta$  é a inclinação da curva de saturação de pressão de vapor (em  $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ),  $\lambda$  é o calor latente de evaporação da água (em  $\text{MJ kg}^{-1}$ ),  $\gamma$  é a constante psicrométrica modificada ( $\gamma = 1 + 0,33 U_2$ , em  $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), e 900 é o fator de conversão de unidade. As medições climáticas podem ser obtidas a partir de uma estação meteorológica automática (EMA) em tempo real.

O cálculo da  $ET_c$  dos genótipos de cereais e leguminosas é feito multiplicando o valor de  $ET_o$  pelo valor do coeficiente de cultura do respectivo genótipo ( $K_c$ ). Todo o processo pode ser realizado automaticamente, desde a aquisição de dados climáticos até o ponto de cálculo de  $ET_c$  de cada genótipo. Cuidados devem ser tomados para o uso adequado de valores de  $K_c$  de cada genótipo para diferentes sítios específicos de fenotipagem para a tolerância à seca.

## Princípios da Termometria a Infravermelho

A tecnologia de registro da temperatura do dossel ( $T_c$ ) de genótipos de cereais e legumes é um método eficiente para a avaliação e seleção rápida de genótipos ("screening") por meio de sensoriamento remoto (Wanjura e Upchurch, 2000; Kostrzewski et al., 2002) com o monitoramento e registro não-destrutivo da resposta da planta inteira ao estresse hídrico, utilizando transdutores de temperatura ou termômetros a infravermelho (IRTs). A porção do infravermelho termal do espectro tem sido usada para acessar e avaliar o estado hídrico de plantas, baseado na correlação direta existente entre as temperaturas do dossel das plantas ( $T_c$ ) e do ar ( $T_a$ ) e o estresse hídrico (Jackson, 1982). Além disso, outros fatores ambientais de clima (déficit de pressão de vapor do ar, saldo de radiação, resistência aerodinâmica e resistência do dossel da cultura) precisam ser considerados para uma boa medida e caracterização dos níveis de estresse hídrico das plantas (Jackson, 1982; Sadler et al., 2002).

Um índice de estresse hídrico de cultura (IEHC) foi posteriormente desenvolvido por Jackson (1982), a partir do balanço de energia da cultura, utilizando a base racional para relacionar o estresse hídrico das plantas e  $T_c$  por meio das equações propostas por Monteith e Szeicz (1962) e Monteith (1973), relacionando a diferença  $T_c - T_a$  com o DPV do ar, saldo de radiação, resistência do dossel da cultura e resistência aerodinâmica:

$$T_c - T_a = \frac{r_a(R_n - G)}{\rho c_p} \cdot \frac{\gamma(1 + r_c/r_a)}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} - \frac{e_a^* - e_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)}$$

onde,  $T_c$  é a temperatura do dossel de genótipos (em °C),  $T_a$  é a temperatura do ar (em °C),  $R_n$  é o saldo de radiação (em  $W m^{-2}$ ),  $G$  é o fluxo de calor de ou para o solo abaixo do dossel (em  $W m^{-2}$ ),  $\Delta$  é a inclinação da curva de saturação de pressão de vapor (em  $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$ ),  $e_a^*$  é a pressão de vapor saturado em  $T_c$  (em Pa),  $e_a$  é a pressão atual do vapor no ponto de medição de  $T_a$  (em Pa),  $\rho$  é a densidade do ar (em  $kg m^{-3}$ ),  $c_p$  é a capacidade térmica do ar à pressão constante (em  $J kg^{-1} \text{ } ^\circ C$ ),  $\gamma$  é a constante psicrométrica (em  $Pa \text{ } ^\circ C^{-1}$ ),  $r_a$  é a resistência aerodinâmica à transferência de calor e massa ( $s m^{-1}$ ), e  $r_c$  é a resistência do dossel à transferência de vapor d'água ( $s m^{-1}$ ). A transferência de calor sensível ( $H$ , em  $W m^{-2}$ ) do dossel das plantas (genótipos) para o ar é dada pelo lado esquerdo da equação e a transferência de calor latente para o ar ou a transferência de calor através da evapotranspiração das plantas é dada pelo terceiro termo do lado direito dessa equação.

Jackson (1982) discutiu os limites de  $T_c - T_a$  para condições extremas de regimes hídricos, um limite superior ( $dT_u$ ) para o máximo estresse hídrico, em que  $r_c$  aumenta indefinidamente, isto é,  $r_c$  tende ao infinito; e outro limite inferior ( $dT_l$ ) para uma condição de plantas sem limitação hídrica, em que se tem  $r_c$  tendendo a zero, sob uma condição de evapotranspiração potencial ou máxima ( $r_{cp}$  e  $ET_p$ ). Com base nesses dois limites, a equação acima se torna respectivamente:

$$T_c - T_a = dT_u = \frac{r_a(R_n - G)}{\rho c_p}$$

$$T_c - T_a = dT_l = \frac{r_a(R_n - G)}{\rho c_p} \cdot \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} - \frac{e_a^* - e_a}{\Delta + \gamma}$$

O índice de estresse hídrico da cultura (IEHC) é calculado com base na seguinte equação:

$$IEHC = 1 - (ET_r / ET_p) = (dT - dT_l) / (dT_u - dT_l)$$

em que,  $ET_r$  e  $ET_p$  são a evapotranspiração real ou atual e potencial ou máxima da cultura, respectivamente,  $dT$  é a diferença  $T_c - T_a$  atual,  $dT_l$  e  $dT_u$  são os limites inferior e superior de  $T_c - T_a$ , respectivamente, que constituem as linhas básicas não estressada ( $dT_l$ ) e estressada ( $dT_u$ ), ajustadas por meio de equações de regressão, relacionando-se a diferença  $T_c - T_a$  com o DPV.

A necessidade hídrica da planta, ou  $ET_c$ , deve ser avaliada a partir de medição dos termos da última equação. Como antes,  $T_c - T_a$  devem ser monitorados com um IRT, um saldo radiômetro deve registrar  $R_n$ , e placas de fluxo de calor do solo devem ser usadas para medir  $G$ . Durante o intervalo relativamente estreito de medição de temperatura e pressão na maioria das condições de

ambiente, os parâmetros  $\lambda$ ,  $c_p$ ,  $\gamma$  e  $\rho_w$  geralmente podem ser considerados constante. No entanto, esses parâmetros também podem ser determinados como funções de temperatura e pressão, se necessário.

As medições de diferenças de  $T_c - T_a$  podem ser tomadas com um dos modelos portáteis de transdutores IRT disponíveis, que deve ser configurado para medir tanto  $T_a$  e  $T_c$ , ou a diferença  $T_c - T_a$ . No entanto, é importante que os modelos de transdutores selecionados para operar sob condições de avaliação e seleção de genótipos para tolerância à seca sigam as seguintes especificações: leituras de baixa faixa de temperaturas de dossel (idealmente até 80 °C); comprimento de onda na banda de 8-14  $\mu\text{m}$ , ou seja, a porção termal do espectro eletromagnético; e emissividade ajustada para 0,98 (para a maioria dos genótipos de cereais e legumes). Para utilização das equações apresentadas há necessidade de registrar em intervalos de pelo menos uma hora os parâmetros de velocidade média do vento a 2 m de altura, DPV do ar e  $R_n$  próximo às parcelas experimentais. Com isso é possível fazer uso das equações que relacionam a diferença real  $T_c - T_a$  (dT).

O uso de  $T_c$  para detectar estresse hídrico em plantas é baseado na relação estreita e inversa entre a  $T_c$  e o resfriamento pela taxa de transpiração das folhas (Jackson, 1982). A água transpirada evapora e resfria as folhas abaixo da temperatura do ar ao seu redor. Com o aumento de estresse hídrico da planta, a resistência ao transporte de vapor d'água devido à energia incidente será particionada cada vez mais em direção ao calor sensível (H) (Campbell e Norman, 1990). A fim de dissipar esse calor adicional,  $T_c$  deve então subir. Portanto, as medições de diferenças de temperaturas  $T_c$  e  $T_a$  (logo acima do dossel, 1,5 m) podem fornecer uma base para a detecção e quantificação de estresse hídrico de plantas.

## Fenotipagem de Tolerância à Seca com Medições de Temperatura do Dossel de Genótipos

Medição remota de temperatura do dossel de genótipos ( $T_c$ ) por meio de um transdutor de temperatura a infravermelho é uma tecnologia eficiente para avaliação e acompanhamento, de uma maneira rápida e não destrutiva, das respostas de plantas inteiras submetidas a pressão de seleção ao estresse hídrico. Com o advento de IRTs portáteis, o conceito de usar medições  $T_c$  para inferir estresse hídrico e consequentemente as taxas de transpiração de genótipos foi bastante aprimorado e recebeu bastantes adeptos para fins de investigação científica no seu uso como uma técnica de "screening" visando a tolerância à seca. A tecnologia dos transdutores a infravermelho melhorou a tal ponto que instrumentos portáteis de peso leve (cerca de 1kg), com uma precisão de  $\pm 0,5$  °C, estão disponíveis no mercado (Jackson et al., 1981). Hoje, alguns sensores IRTs podem ser equipados com microprocessadores dedicados, que integram diretamente medições de  $T_c$  e de alguns parâmetros climáticos do ambiente para fornecer e registrar diretamente o IEHC.

O uso de respostas de  $T_c$  de genótipos de plantas de parcelas sob diferentes regimes hídricos (de bem irrigado à vários níveis de estresse de água) depende da estratégia de manejo da água de irrigação na área da parcela (incluindo a água de precipitação e irrigação), da espécie do genótipo da planta envolvida e da sensibilidade ao estresse hídrico desse genótipo em diferentes fases de seu ciclo de crescimento. No entanto, existem algumas limitações no uso de medidas de  $T_c$  de ambientes com bastante limitação hídrica-seca. Com o aumento do déficit hídrico do solo, a variabilidade de textura e da capacidade de retenção de água solo se torna uma fonte importante de variação que pode mascarar diferenças de respostas genotípicas. Outra limitação é que a medição remota de  $T_c$  requer uma copa densa cobrindo completamente a superfície do solo (Blum et al., 1982; Clarke e McCaig, 1982; Jackson, 1982), a fim de evitar erros decorrentes da visão da superfície do solo exposto. No entanto, sob condições de seca extrema, o fechamento do dossel completo pode nunca ser atingido. Essa última limitação pode ser atenuada com o uso de IRTs com baixo campo de visada de sua lente, permitindo a leitura de  $T_c$  de até uma só folha, quando a leitura é realizada bastante próxima a essa folha.

O índice de estresse de temperatura (IET), definido por Gardner et al (1986) como a diferença de  $T_c$  obtido ao meio-dia entre uma localização específica e a área de produção de rendimento máximo para cada híbrido de milho, foi usado para estabelecer uma forma de relação entre IET e produção relativa de grãos para a avaliação de tolerância à seca de híbridos de milho. Eles encontraram correlação positiva ( $r = 0,70$ ;  $P < 0,01$ ) entre as temperaturas de dossel sem estresse hídrico e rendimento de grãos de híbridos de milho e também relataram que os valores cumulativos de IET podiam ser usados para estimar a produtividade de grãos de  $\pm 4\%$  para os híbridos específicos. Eles consideraram que essa ferramenta é de potencial importância para a seleção de resposta à seca em milho.

Vários autores (Blum et al., 1982; Ehrlér et al., 1978; Hatfield et al., 1987; Jackson, 1982) têm apontado que a temperatura das folhas das plantas tem sido reconhecida como um bom indicador da disponibilidade de água das plantas. Resultados de trabalhos relatados por Idso et al (1977), Jackson et al (1977) e Jackson et al (1981) estabeleceram um método para quantificar o estresse hídrico de plantas com base em medições de diferenças entre  $T_c$  e  $T_a$ .

Existem pelo menos duas principais situações em que as medições de  $T_c$  poderiam ser melhor utilizadas na seleção ("screening") para tolerância à seca. A primeira envolve as características da temperatura foliar que são medidas sob baixas condições de umidade do solo (estresse hídrico), onde as plantas mostrando valores de  $T_c$  mais baixos (um efeito de "cooler") estão transpirando a taxas mais elevadas e, portanto, são capazes de taxas relativamente elevadas de fotossíntese e crescimento e consequentemente maior produção. A segunda situação pode ocorrer em genótipos que

apresentam valores de  $T_c$  mais elevados (quentes) em condições bem irrigadas (sem estresse hídrico). Isto poderia indicar uma maior tolerância à seca, com base no raciocínio de que as plantas com maior  $T_c$  transpiram menos, poupando água no solo para o seu crescimento e o seu esforço reprodutivo mais tarde, no final de seu ciclo fenológico - a chamada "estratégia conservadora" daquelas plantas.

## Aplicação, Resultados e Discussão do Uso da Tecnologia

Gardner et al (1986) relataram que a redução da produtividade em milho sob condições de falta de água foi menor para o híbridos que mantiveram temperaturas ligeiramente mais frias sob pressão de seleção devido a limitação hídrica.

Alguns investigadores têm utilizado medidas de  $T_c$  de parcelas com estresse hídrico para avaliar a resposta dos genótipos à seca. Estabilidade de rendimento sob diferentes condições de umidade no solo tem sido caracterizada por Blum et al (1989), por meio da medição de  $T_c$  em genótipos de trigo submetidos à seca. O autor encontrou uma correlação positiva ( $r = 0,72$ ,  $p < 0,01$ ), entre o Índice de susceptibilidade à seca e às temperaturas do dossel entre genótipos, indicando que os genótipos suscetíveis à seca, que sofreram as maiores perdas de rendimento sob estresse, também tenderam a apresentar um valor de  $T_c$  maior (mais quente) ao meio-dia. Em sorgo sob condições de estresse hídrico,  $T_c$  foi geralmente de  $3,2 - 3,7$  °C mais quente do que em plantas sem estresse de água, bem irrigadas (Chaudhuri e Kanemasu, 1982). Esses autores encontraram que os rendimentos dos híbridos de sorgo foram negativamente correlacionados com a média sazonal  $T_c$  ( $r = -0,92$ ;  $P < 0,05$ ) e as diferenças de temperaturas  $T_c - T_a$  ( $r = -0,94$ ;  $P < 0,05$ ). Variação genotípica de temperatura foliar também foi observada em soja cultivada em ambientes estressados (Harris et al., 1984), e resultados semelhantes foram relatados para a cultura da batata (Stark e Pavek, 1987).

Sob condições irrigadas e sem estresse hídrico  $T_c$  fornece uma boa indicação do desempenho do rendimento potencial de um genótipo durante a seca e pode ser utilizada como uma técnica eficaz para avaliar a resposta genotípica à seca. Singh e Kanemasu (1983) encontraram uma correlação negativa significativa ( $r = -0,81$ ;  $P < 0,05$ ) entre produção de grãos e média do período da tarde de  $T_c$  em genótipos de milho, em condições irrigadas. A correlação entre a produtividade média e a média do período da tarde de  $T_c$  medido em condições não irrigadas também foi negativa, mas fraca ( $r = -0,27$ ;  $P < 0,05$ ). Eles classificaram genótipos de milho (*Pennisetum americanum* L), com valores de  $T_c$  medido, relativamente mais elevados (quentes) e mais baixos (frios), em condições irrigadas. Genótipos com  $T_c$  mais elevados (quentes) sob condições irrigadas, quando cultivados sob condições não irrigadas, tiveram um rendimento significativamente maior que os genótipos com valores de  $T_c$  mais baixos em condições não irrigadas (sequeiro).



Chaudhuri et al (1986) constataram que os genótipos de sorgo e milho apresentaram maiores valores de  $T_c$  (mais quentes) e foram os mais produtivos em geral, que os genótipos mais frios sob condições de estresse de seca. Em outro estudo, Stark et al (1991) relataram que genótipos de batata (*Solanum tuberosum* L) mais quentes sob condições bem irrigada também foram geralmente menos suscetíveis à seca do que os genótipos mais frios. Pinter et al (1990) compararam as temperaturas do meio-dia do dossel de genótipos de trigo bem irrigados com o rendimento relativo de grãos sob estresse de seca. As cultivares que foram mais quentes sob condições bem irrigada mantiveram o maior rendimento relativo quando expostas a regimes de déficit de irrigação ( $r = 0,78$ ;  $P < 0,05$ ).

A relação entre as diferenças de  $T_c$  e  $T_a$  ( $T_c - T_a = \Delta T$ ) e DPV do ar foi usada por alguns pesquisadores para avaliar a resposta à seca. Chaudhuri et al (1986) desenvolveram relações entre DPV e  $\Delta T$  medido de parcelas bem irrigadas e, em seguida, usaram essas relações para avaliar a resposta à seca de 219 genótipos de sorgo. Esses autores encontraram que os genótipos de sorgo que foram menos sensíveis a mudanças no DPV produziram mais grãos em condições de estresse hídrico.

Um termômetro a infravermelho (National, modelo ER 2008), posicionado num ângulo de cerca de  $45^\circ$  em relação à superfície do dossel das plantas, a uma distância de 2 m, resultando num diâmetro de visada de aproximadamente 7 cm, com o operador realizando quatro leituras voltadas para cada um dos pontos cardeais, foi usado por Albuquerque et al., (1998) para a obtenção de valores de IEHC de um feijoeiro irrigado, sob 4 regimes hídricos diferentes, no período da fase de crescimento entre os 29 e 80 dias após a semeadura (DAS). Todos os quatro tratamentos hídricos receberam um total de 118,8 mm de água aplicada da semeadura até aos 28 DAS, com intervalo médio entre as irrigações de quatro dias. Após esta fase de crescimento da cultura, iniciou-se a diferenciação dos tratamentos hídricos, com a aplicação de lâminas de irrigação diferenciadas, com base nas frequências de irrigação de 4, 8, 12 e 16 dias, que constituíram os tratamentos. Da semeadura à colheita da cultura, as quantidades totais de água aplicada foram de 439,6; 385,6; 326,5 e 290,4 mm para os tratamentos T4, T8, T12 e T16, respectivamente.

As Figuras 1 e 2 mostram a variação do IEHC com o período de crescimento (expressado como DAS) para as quatro frequências de irrigação (T4, T8, T12 e T16) e dois períodos de medições (manhã: 10:00 às 11:00 horas e tarde: 13:00 às 14:00 horas), respectivamente (Albuquerque et al., 1998). O tratamento T4 foi considerado como aquele em que houve um adequado suprimento de água para a cultura, sem restrição hídrica. Os resultados mostram que T4 apresentou as menores variações nos valores de IEHC, que foram mantidos próximo ao nível de zero, indicando não acarretar estresse hídrico à cultura. A análise dos dois períodos de medições, manhã e tarde, indicou uma tendência similar nas variações dos valores de IEHC.

No entanto, os valores mais elevados de IEHC foram obtidos durante as medições do período da tarde. Isso sugere que o melhor período para as medições de  $T_c$  é o da tarde. O tratamento que causou os maiores níveis de IEHC foi o T16, que atingiu valores de 0,26 e 0,40 para os períodos da manhã e tarde respectivamente. No geral, observou-se que os valores de IEHC de cerca de 0,20 podem ser usados como um limite nas estratégias de manejo de água de irrigação, para diferenciar as condições de regime hídrico de não-estressado para estressado, sem acarretar perdas significantes de produção.

A termometria a infravermelho foi usada com um sistema de posicionamento global diferencial (DGPS) para a espacialização de índice de estresse hídrico da cultura (IEHC) do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em área irrigada por pivô central (Gomide et al., 2005), com o intuito de integrar os dados de IEHC, altimetria da área e produtividade de grãos a um sistema de informação geográfica (SIG). Para isso, usou-se um pivô central de 38 ha, na Embrapa Milho e Sorgo, instalado num Latossolo Vermelho-Escuro álico, em área de cerrado. Na ocasião da colheita, os dados de produtividade da área foram obtidos por meio de uma automotriz dotada de antena, receptor DGPS e monitor automático de produtividade de grãos. A temperatura do dossel da cultura ( $T_c$ ) foi registrada por meio de um IRT, da Everest Interscience, modelo 510B, com ângulo de visada de  $1^\circ$ , faixa de espectro de 8 a 14  $\mu\text{m}$  e emissividade de 0,98. As leituras de  $T_c$  foram realizadas aos 74 dias após a semeadura (12/09/2002), no estágio fenológico R6 ou floração, no horário de 9 às 16 h, sob condição de céu claro, com o IRT distanciado de 2 a 3 m dos alvos e o eixo de visada do instrumento formando um ângulo de cerca de  $45^\circ$  em relação à superfície do dossel da cultura.

As leituras de  $T_c$  foram realizadas próximo às direções de deslocamento das torres do pivô central, com visadas do IRT nos sentidos leste-oeste e norte-sul (Figura 3). O transdutor, mantido sempre a 1,5 m de altura acima do dossel da cultura, registrou também os valores de temperatura do ar ( $T_a$ ), déficit de pressão de vapor do ar (DPV) e radiação solar. Com o auxílio de um DGPS, via satélite, da Trimble (modelo AG114), de precisão submétrica, foram georreferenciados as áreas de amostragem de leituras do IRT e os dados de altimetria da área (Figura 3). A área irrigada apresentou superfície uniforme, suavemente ondulada, com declividade média de 7,9 % na direção ao eixo leste-oeste e desnível total de 55 m. A integração dos dados georreferenciados de elevação, IEHC e produtividade da cultura ao sistema de informação geográfica (SIG) foi realizada com o "software" SPRING, versão 4.0, para posterior acesso, processamento e análises de variabilidade desses dados na área do pivô (Gomide et al., 2005).

Os mapas de variação do índice de estresse hídrico de cultura (IEHC) e da produtividade de grãos de feijão na área do pivô central encontram-se na Figura 4. De um modo geral, os valores de IEHC variaram de 0,0 a 0,2 e 0,2 a 0,4 em 65,3% e 15,3% da área irrigada, respectivamente (Gomide et al.,

2005). Para a cultura irrigada, os níveis de produtividade foram baixos. Isto pode ser justificado pela baixa uniformidade de distribuição de água do pivô, principalmente nas áreas mais elevadas (aclive) onde avaliações de campo forneceram valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen da ordem de 68 %. A produtividade de grãos variou de 200 a 3000 kg/ha. A região da parte mais elevada (oeste) do pivô apresentou as menores produtividades e os maiores IEHC (Figura 4). Nesta região, verificou-se a predominância de um rendimento de grãos de 200 a 750 kg/ha e uma variação de IEHC de 0,6 a 1,0, que corresponderam a 4,6 % e 9,8 % da área irrigada, respectivamente. Registrou-se produtividade da ordem de 750 a 1400 kg/ha e 1400 a 2000 kg/ha em 53,5 % e 35 % da área irrigada, respectivamente, onde prevaleceram valores de IEHC de 0,2 a 0,4. Apenas 7% da área irrigada forneceu os maiores rendimentos (2000 a 3000 kg/ha) com valores de IEHC de 0,0 a 0,2.

## Recomendações e Conclusões

A coleta de dados ambientais sobre a água de irrigação e chuva, as condições climáticas local, o conteúdo de umidade no perfil do solo, na região efetiva de desenvolvimento das raízes, a fenologia e alguns parâmetros fisiológicos das plantas e o sistema de manejo da cultura é essencial quando a água é limitada/escassa (estresse hídrico/ seca) e a demanda evaporativa da atmosfera é elevada, a fim de melhor compreender os efeitos das interações dos genótipos (G) com o ambiente (A).

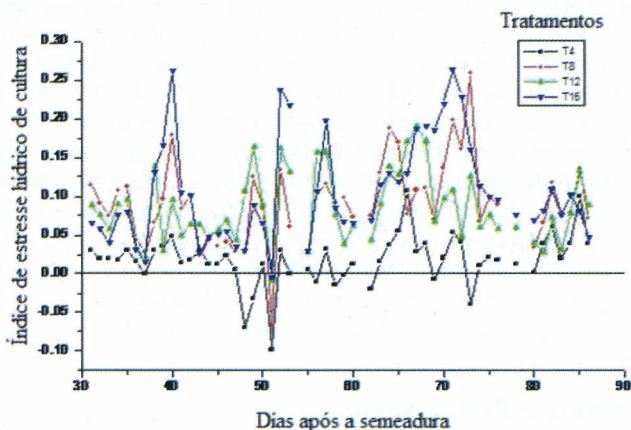
Medições de temperatura do dossel de plantas ( $T_c$ ) com transdutores de temperatura a infravermelho (IRT) têm sido usadas para triagem (screening) visando a tolerância à seca em muitas culturas. Segundo vários autores, duas abordagens básicas poderiam ser adotadas para a utilização de  $T_c$  visando a seleção para resistência à seca:

1. A identificação de genótipos com temperaturas  $T_c$  relativamente baixas (frias), em condições de baixa umidade do solo, ou
2. A identificação de genótipos com  $T_c$  relativamente mais altas (quentes) sob condições bem irrigadas, sem estresse hídrico.

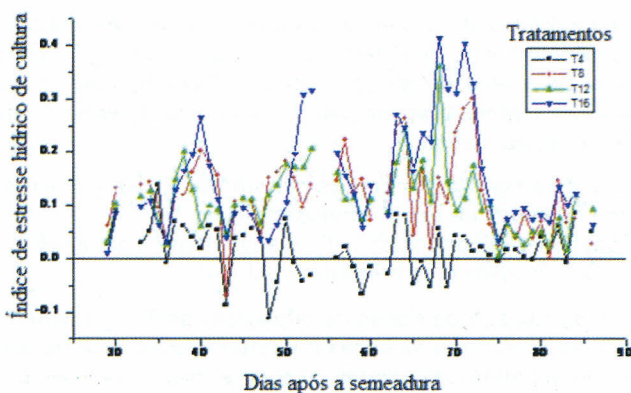
O uso de IRT's no registro de dados de diferenças de  $T_c - T_a$  e déficit de pressão de vapor (DPV) do ar mostrou-se eficaz na determinação de IEHC e possibilitou a fenotipagem de genótipos de plantas visando a tolerância à seca.

Índice de estresse hídrico de cultura (IEHC) da ordem de 0,20 tem sido usado como um valor-limite para diferenciar a cultura de uma condição hídrica de não estressada para estressada.

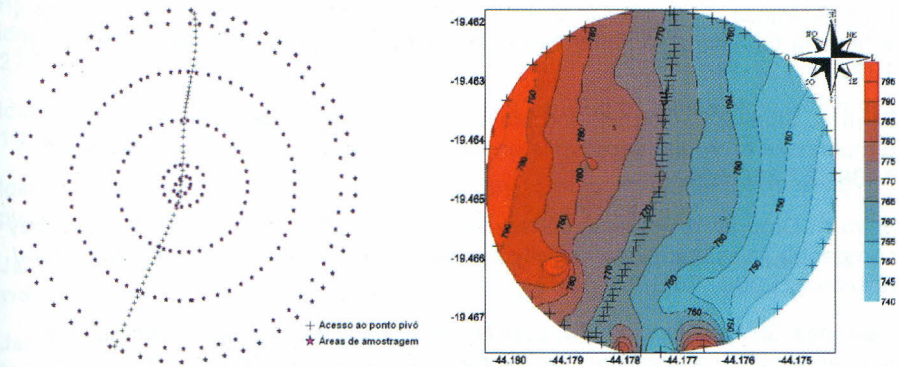
Para os ensaios de fenotipagem de cereais e legumes visando à tolerância à seca, os valores de IEHC na faixa de 0,6 a 0,7 tem sido utilizado, quando se pretende atingir reduções de mais de 50% da produção de grãos dos genótipos estudados.



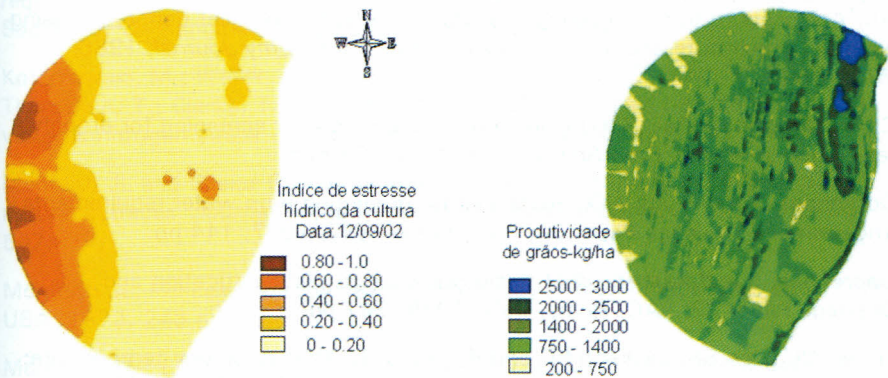
**Figura 1.** Variação do índice de estresse hídrico de cultura (IEHC) da cultura do feijoeiro em função de dias após a semeadura e frequências de irrigação (T4, T8, T12 e T16), para o período de medições de 10:00 às 11:00 horas da manhã (Albuquerque et al., 1998).



**Figura 2.** Variação do índice de estresse hídrico de cultura (IEHC) da cultura do feijoeiro em função de dias após a semeadura e frequências de irrigação (T4, T8, T12 e T16), para o período de medições de 13:00 às 14:00 horas da tarde (Albuquerque et al., 1998).



**Figura 3.** Localização das áreas de leituras do transdutor de temperatura a infravermelho (IRT) próximo às direções de deslocamento das torres do pivô (esquerda) e variação de elevação com curvas de nível a cada 5 m da área do pivô central (direita) (Gomide et al., 2005).



**Figura 4.** Variação espacial do índice de estresse hídrico de cultura (IEHC) durante a floração do feijão (esquerda) e da produtividade de grãos de feijão (direita) na área do pivô central (Gomide et al., 2005).

## Referências

Albuquerque, P.E.P.; Gomide, R.L.; Klar, A.E. Crop water stress index for beans obtained from temperature difference between canopy and air. In: *1<sup>st</sup> Inter-Reg. Conf. Environment-Water: innovative issues in irrigation and drainage*, Lisbon, Portugal, 1998. p. 189-196.

Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56, Food and agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy, 1998, 300 pp.

Blum A, Mayer J and Gozlan G. Infrared thermal sensing of plant canopies as a screening technique for dehydration avoidance in wheat. *Field Crops Research*, 1982, 5:137-146.

Blum A, Shipiler L, Golan G and Mayer J. Yield stability and canopy temperature of wheat genotypes under drought stress. *Field Crops Research*, 1989, 22:289-296.

Blum A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential – are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? *Australian Journal of Agricultural Research*, 2008, 56:1159-1168.

Campbell GS and Norman JM. Estimation of plant water status from canopy temperature: An analysis of the inverse problem. In: *Applications of remote sensing in agriculture* (Steven MD and Clark JA, ed). Butterworths, London, UK, 1990, pp 225-271.

Chaudhuri UN and Kanemasu ET. Effect of water gradient on sorghum growth, water relations and yield. *Canadian Journal of Plant Science*, 1982, 62:599-607.

Chaudhuri UN, Deaton ML, Kanemasu ET, Wall GW, Marcarian V and Dobrenz AK. A procedure to select drought-tolerant sorghum and millet genotypes using canopy temperature and vapor pressure deficit. *Agronomy Journal*, 1986, 78:490-494.

Clarke JM and McCaig TN. Evaluation of techniques for screening for drought resistance in wheat. *Crop Science*, 1982, 22:503-506.

Doorenbos J and Pruitt WO. Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome, Italy, 1977, 144 pp.

Doorenbos, J and Kassam, A.H. Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper 33, FAO, Rome, Italy, 1979, 287 pp.

Ehrler WL, Idso SB, Jackson RD and Reginato RJ. Wheat canopy temperature: relation to plant water potential. *Agronomy Journal*, 1978, 70:251-256.

Gardner BR, Blad BL and Wilson GD. Characterizing corn hybrid moisture stress sensitivity using canopy temperature measurements. *Remote Sensing of Environment*, 1986, 19:207-211.

Gomide, R. L.; Kobayashi, M. K.; Avellar, G. Aplicação da termometria a infravermelho e do sistema de posicionamento global diferencial na espacialização de índice de estresse hídrico da cultura do feijoeiro em área irrigada por pivô central. In: *XIV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia*, Campinas, SP, 18 a 21 de julho de 2005, 2005. Anais em CD ROM 3 p.

Harris DS, Schapaugh Jr WT and Kanemasu ET. Genetic diversity in soybean for leaf canopy temperature and the association of leaf temperature and yield. *Crop Science*, 1984, 24:839-842.

Hatfield JL, Quisenberry JE and Dilbeck RE. Use of canopy temperature to identify water conservation in cotton germplasm. *Crop Science*, 1987, 27:269-273.

Idso SB, Jackson RD and Reginato RJ. Remote sensing of crop yields. *Science*, 1977, 196:19-25.

Idso, S.B. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology* 27:59-70, 1982.

Jackson RD, Idso SB, Reginato RJ and Pinter Jr PJ. Canopy temperatures as waterstress indicator. *Water Resources Research*, 1981, 17:1133-1138.

Jackson RD, Reginato RJ and Idso SB. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*, 1977, 13:651-656.

Jackson RD. Canopy temperature and crop water stress. *Advanced Irrigation*, 1982, 1:43-85.

Jensen ME, Burman RD and Allen RG. *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. ASCE Manual and reports on engineering practice 70, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA, 1990, 332 pp.

Kostrzewski, M.; Waller, P.; Guertin, P.; Haberland, J.; Colaizzi, P.; Barnes, E.; Thompson, T.; Clarke, T.; Riley, E.; Choi, C. Ground-based remote sensing of water & nitrogen stress. *ASAE. Trans. of the ASAE* 46(1): 29-38. 2002.

Monteith JL and Szeicz G. Radioactive temperature in the heat balance of natural surfaces. *Journal of the Royal Meteorological Society*, 1962, 88:496-507.

Monteith JL. *Principles of environmental physics*. American Elsevier, New York, USA, 1973, 243 pp.

Moran, S.M., T.R. Clarke, Y. Inoue; A. Vidal. Estimating crop water deficit using the relationship between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 49:246-263, 1994.

Pinter Jr PJ, Zipoli G, Reginato RJ, Jackson RD and Idso SB. Canopy temperature as an indicator of differential water use and yield performance among wheat cultivars. *Agricultural Water Management*, 1990, 18:35-48.

Sadler, E.J.; Camp, C.R.; Evans, D.E.; Millen, J.A.. Corn canopy temperature measured with a moving infrared thermometer array. *ASAE. Transaction of the ASAE* 45(3): 581-591. 2002.

Singh P and Kanemasu ET. Leaf and canopy temperatures of pearl millet genotypes under irrigated and nonirrigated conditions. *Agronomy Journal*, 1983, 75:497-501.

Smith M, Segeren A, Pereira LS, Perrier A and Allen R. *Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements*. Land and Water Development Division, FAO, Rome, Italy, 1991, 45 pp.

Stark JC and Pavék JJ. Selection of drought tolerant potato clones using foliage temperature measurements. In: *Proceedings, 10th Triennial Conference of the European Association for Potato Research* (Foldo NE, Hansen SE, Nielsen NK and Ramsmussen R, eds). Aalborg, Denmark, 1987, pp: 26-27.

Stark JC, Pavék JJ and McCann IR. Using canopy temperature measurements to evaluate drought tolerance of potato genotypes. *Journal of American Society of Horticultural Science*, 1991, 116:412-415.

Wanjura, D.F.; Upchurch, D.R. Canopy temperature characterization of corn and cotton water status. *ASAE. Transaction of the ASAE* 43(4): 867-875. 2000.