

ISSN 0104-1347

Utilização do CWSI na determinação de estresse hídrico em cultura de soja¹

Utilization of the CWSI on water stress detection in soybean

Edemo João Fernandes² e José Eduardo Pitelli Turco²

Resumo: O objetivo do trabalho foi determinar o estresse hídrico em cultura de soja submetida a três regimes de irrigação. Utilizaram-se 4 tratamentos: T1 - irrigação baseada na estimativa da evapotranspiração da cultura; T2 e T3 - parcelas irrigadas quando as médias das leituras dos tensiômetros instalados a 0,40m de profundidade atingissem 40 e 81kPa, respectivamente, e T4 - irrigado somente no desenvolvimento inicial da cultura. Para determinação do Crop Water Stress Index (CWSI) foram efetuadas dez leituras da temperatura da cobertura vegetal (T_c), em cada parcela, próximo ao meio-dia solar e a linha de base inferior foi obtida por intermédio de uma regressão linear entre a diferença dos valores das temperaturas da cobertura vegetal e do ar e o déficit de pressão de vapor. Os resultados mostraram que os valores de água disponível no solo não foram um bom indicador do tratamento mais produtivo. O CWSI conseguiu detectar estresse hídrico na cultura de soja e o tratamento mais produtivo foi aquele que apresentou os menores valores de CWSI.

Palavras-chave: termometria a infravermelho, temperatura da cobertura vegetal, irrigação.

Abstract: The aim of this work was to determine water stress in soybean submitted to three irrigation regimes. The following treatments were compared: T1 - irrigation based on estimate crop evapotranspiration; T2 and T3 - plots irrigated when the average tensiometer readings at 0.40m depth reached 40 and 81kPa, respectively, and T4 - irrigated only to promote the initial development of the crop. It was made ten readings of canopy temperature in each plot, close to solar mid-day to estimate CWSI, and the lower base line was obtained by linear correlation between $T_c - T_a$ and vapor pressure deficit. The results showed that the available soil water was not a good indicator of productivity. The CWSI was a good detector of water stress on the soybean crop and higher crop yield was obtained with the treatment that presented lowest CWSI values.

Key words: infrared thermometry, canopy temperature, irrigation.

Introdução.

As culturas são expostas a níveis variados de estresse induzido pelo ambiente durante seus ciclos de desenvolvimento. Visto que o estresse afeta a produtividade, métodos para quantificar e monitorar estresse de culturas tem recebido extensiva atenção de pesquisadores.

O estresse hídrico pode influenciar vários processos da planta incluindo potencial de água e temperatura da cobertura vegetal e sua identificação tem sido uma ferramenta útil na caracterização do estado hídrico da planta.

Para a determinação de estresse hídrico em culturas foi desenvolvido, inicialmente, um valor de

¹Trabalho financiado pela FAPESP.

²Professor Assistente Doutor, Departamento de Engenharia Rural. FCAV/UNESP, Jaboticabal, SP, CEP 14884-900, e-mail: ejfernan@fcav.unesp.br.

grau de estresse diário, definido pela diferença entre as temperaturas da cultura (T_c) e do ar (T_a), medido ao meio-dia solar, o qual foi correlacionado com a produtividade (IDSO et al., 1978; JACKSON et al., 1977; WALKER & HATFIELD, 1979). Posteriormente, um método denominado Crop Water Stress Index (CWSI) foi desenvolvido empiricamente por IDSO et al. (1981), o qual utiliza limites teóricos superior e inferior para $T_c - T_a$ para qualquer déficit de pressão de vapor.

O objetivo das linhas de base superior e inferior é para formar um limite para o qual a temperatura da cobertura vegetal possa ser normalizada. O limite superior representa uma diferença de temperatura fictícia que ocorreria se a vegetação estivesse seca, sem transpirar, ou seja, que toda a água tivesse sido removida da vegetação sem qualquer mudança em sua arquitetura. A rugosidade da vegetação permaneceria a mesma, mas a vegetação estaria mais quente porque a radiação líquida seria consumida, em sua maior parte, pelo fluxo de calor sensível ao invés de calor latente. A radiação líquida seria menor sob tal condição, porque a superfície refletiria e emitiria mais radiação do que a vegetação verde. O limite inferior representa uma outra diferença fictícia de temperatura, que seria obtida se a cultura estivesse em conforto hídrico, sem inibição interna para a transpiração. Nessas condições, a temperatura da cobertura vegetal atingiria um mínimo na condição ambiental vigente (JACKSON et al, 1988).

Esse método empírico tem recebido considerável atenção devido à sua simplicidade e ao fato de que necessita somente das leituras das temperaturas da cobertura vegetal e do ar e déficit de pressão do vapor do ar.

Na literatura são escassas as informações de resultados desse índice em cultura de soja, como o de KHERA & SANDHU (1986), os quais relataram que quando a planta é submetida a déficits hídricos, responde com um aumento da temperatura foliar e que a temperatura da superfície vegetal pode ser utilizada para monitoramento da irrigação. PEÑUELAS et al. (1992) concordam com essa afirmação, sugerindo que o CWSI parece ser o melhor índice, porque incorpora variáveis meteorológicas. JACKSON (1982), IDSO & REGINATO (1982), NAKAYAMA & BUCKS (1984) e JONES (1999) enfatizam a utilização do CWSI em programas de irrigação e monitoramento de estresse hídrico de culturas em regiões áridas.

Em relação à produtividade, STEGMAN & SODERLUND (1992) relataram que essa não foi afe-

tada quando a irrigação foi realizada antes que o valor do CWSI atingisse 0,5. Relataram também, que é possível atrasar as irrigações até níveis de estresse maiores, sem afetar a produtividade, aumentando assim a eficiência do uso da água. GARROT Jr. et al. (1994) determinaram que a produção de grãos de trigo e a quantidade total de água aplicada via irrigação foram altamente correlacionadas com valores de CWSI e que a maior produtividade ocorreu quando as irrigações foram efetuadas com os seus valores variando de 0,30 a 0,37. Irrigações efetuadas com valores de CWSI maiores do que 0,37 reduziram a produtividade de grãos.

ANDREWS et al. (1992) relataram que a parcela sob estresse hídrico apresentou valores pouco maiores de CWSI do que a parcela mantida sem estresse e isso poderia ser devido às variações do saldo de radiação e da evapotranspiração que ocorrem em climas temperados e úmidos.

O presente trabalho teve como objetivo determinar o CWSI, desenvolvido por IDSO et al. (1981), em cultura de soja e verificar sua validade na detecção de estresse hídrico da cultura.

Material e métodos

O ensaio foi instalado na Área Demonstrativa e Experimental de Irrigação (ADEI), da FCAV/UNESP, campus de Jaboticabal, SP. As coordenadas geográficas são 21°15' de latitude sul e 48°18' de longitude oeste, sendo a altitude média de 570m, apresentando clima tipo Cwa (subtropical) de acordo com a classificação de Köppen.

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Roxo eutrófico (ALOISI & DEMATTÊ, 1974), horizonte A moderado, textura argilosa, relevo suave ondulado.

O preparo do solo da área experimental foi o convencional, constando de uma subsolagem e duas gradagens, sendo uma com grade pesada, efetuada logo após a subsolagem e a outra com grade leve, antes da semeadura. A adubação da cultura constou de 300 kg ha⁻¹ dos elementos N-P-K na formulação 2-20-20. Utilizou-se o sistema de irrigação por aspersão convencional com espaçamento de 18 x 18m, sendo semeada a cultivar IAS-5 em 06/5/93, com espaçamento de 0,63cm entre linhas e a emergência de 70% das plântulas ocorreu em 10/5/93. A área total do experimento constou de 1,0ha sendo 0,2ha a área útil de cada parcela.

Os tratamentos foram designados da seguinte maneira:

Tratamento T1 - Efetuou-se a irrigação dessa parcela quando a soma dos valores diários da evapotranspiração da cultura (ETc), obtida por meio de dados de evaporação de um tanque classe A e do coeficiente da cultura, atingia 19,0mm (40% da água disponível na camada do solo até 0,60m de profundidade) como sugerido por DOORENBOS & PRUIT (1976), com a ETc sendo calculada por intermédio das seguintes equações:

$$ET_o = E_{ca} \cdot k_p \quad (1)$$

$$ET_c = ET_o \cdot k_c \quad (2)$$

em que ET_o é a evapotranspiração de referência (mm), E_{ca} a evaporação medida no tanque classe A (mm), k_p o coeficiente do tanque classe A e k_c o coeficiente da cultura da soja.

Tratamentos T2 e T3 – As irrigações das parcelas desses tratamentos foram baseadas em leituras de tensiômetros, os quais estavam instalados às profundidades de 0,20; 0,40; 0,60; 0,80 e 1,00m. A metodologia adotada para a irrigação constou em, inicialmente, acompanhar os valores das tensões de água no solo nos tensiômetros instalados a 0,20m de profundidade até que atingissem 60 e 80kPa, respectivamente, para os tratamentos T2 e T3 (KATERJI & HALLAIRE, 1984). Nessas ocasiões, as médias das tensões nos tensiômetros a 0,40m de profundidade foram 40,1 (T2) e 80,7kPa (T3). A partir desses momentos, as irrigações nas parcelas desses tratamentos foram sempre realizadas quando as tensões médias na profundidade de 0,40m atingissem os valores citados. A lâmina de água aplicada foi baseada na somatória da ETc diária ocorrida no intervalo entre as irrigações.

Tratamento T4 - Essa parcela foi irrigada após a semeadura para favorecer a emergência das plântulas e aos 29 dias após a emergência (d.a.e.), para iniciar o experimento com todos os tratamentos na mesma condição hídrica do solo e, posteriormente, nenhum aporte de água foi efetuado, até o final do ciclo da cultura, ocorrendo apenas precipitações pluviais. O objetivo desse tratamento foi verificar a resposta da cultura, tendo em vista o esgotamento progressivo da água do solo, além de servir como referencial para os outros tratamentos em relação ao índice de estresse hídrico.

A capacidade de água disponível no solo (CAD) foi determinada por meio da seguinte equação:

$$CAD = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) \cdot z \quad (3)$$

em que θ_{cc} e θ_{pmp} são as umidades volumétricas na

capacidade de campo e ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), respectivamente, e z a profundidade efetiva das raízes (mm).

A água disponível no solo foi calculada por intermédio da seguinte expressão matemática:

$$AD = (\theta_a - \theta_{pmp}) \cdot z \quad (4)$$

em que θ_a é a umidade atual de água no solo, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

Nas profundidades de 0,20; 0,40; 0,60; 0,80 e 1,00m foram determinados os potenciais de água no solo, por meio do método da câmara de pressão de Richards (RICHARDS, 1941), até -100kPa, sendo a capacidade de campo determinada com o uso da curva de retenção de água no solo, ajustada pela expressão matemática desenvolvida por GENUCHTEN (1980):

$$q = q_r + \frac{(q_s - q_r)}{[1 + (\Psi \cdot \alpha)^n]^m} \quad (5)$$

em que θ é a umidade a base de volume ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), Ψ o potencial de água no solo (cm de coluna de água), θ_r a umidade residual ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_s a umidade de saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), α , m e n os parâmetros empíricos do modelo matemático.

Em cada parcela foram instaladas três baterias de tensiômetros nas profundidades de 0,20; 0,40; 0,60; 0,80 e 1,00m com a finalidade de acompanhar a variação do conteúdo de água no solo, utilizando-se da equação 5.

O valor da lâmina de água aplicada em cada irrigação foi determinado pela média das quantidades de água recebidas em oito pluviômetros distribuídos em cada parcela. As irrigações foram iniciadas sempre no período da manhã, de maneira que se pudesse efetuar as leituras da temperatura da cobertura vegetal próximo ao meio dia solar.

As leituras das temperaturas da cobertura vegetal, do ar ambiente e do bulbo úmido, foram efetuadas ao mesmo tempo, com um termômetro a infravermelho portátil de ângulo de visada (ângulo sólido) de 3° , utilizando-se uma inclinação do aparelho de aproximadamente 30° com a horizontal, para a visada. Foram efetuadas 10 visadas em cada parcela, ao acaso, realizadas próximo ao meio dia solar, não sendo efetuadas leituras quando estava nublado. O valor da temperatura da cobertura vegetal e do ar, em cada parcela, foi obtido pela média das 10 visadas. Esses valores foram utilizados para o cálculo do Crop Water Stress Index (CWSI).

$T_c - T_a$ foi calculado por intermédio da equação proposta por JACKSON et al (1981), a qual relaciona essa diferença com o déficit de pressão de vapor do ar (DPV), radiação líquida e resistências aerodinâmica e da cultura:

$$T_c - T_a = \frac{r_a R_n}{r c_p} \frac{g(1 + r_c / r_a)}{\Delta + g(1 + r_c / r_a)} - \frac{e_a^* - e_a}{\Delta + g(1 + r_c / r_a)} \quad (6)$$

em que r_a e r_c são as resistências aerodinâmica e da cultura ($s\ m^{-1}$), R_n a radiação líquida ($W\ m^{-2}$), γ a constante psicrométrica ($kPa\ ^\circ C^{-1}$), e_a^* a pressão de saturação do vapor d'água a T_a (kPa), e_a a pressão parcial do vapor d'água a T_a (kPa), ρ a densidade do ar ($kg\ m^{-3}$), c_p a capacidade calorífica do ar ($J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$) e Δ a tangente à curva de pressão de saturação de vapor em relação à temperatura ($kPa\ ^\circ C^{-1}$).

A radiação líquida foi estimada por meio da equação desenvolvida por ANDRÉ & VISWANADHAM (1983) para a cultura de soja, na região de Jaboticabal, SP:

$$R_n = 1,12 R_s (1 - 0,25) + 7,45 \quad (7)$$

em que R_s é a radiação solar global ($W\ m^{-2}$).

A equação 6 representa o caso de evaporação de uma superfície de água livre, a qual não é necessariamente o caso da evaporação potencial de uma cultura, na qual a resistência não é provavelmente zero (van BAVEL & EHRLER, 1968), mas tem um valor que é chamado de resistência da cultura à evapotranspiração potencial (r_{cp}). Substituindo $r_c = r_{cp}$ na equação 6 tem-se:

$$T_c - T_a = \frac{r_a R_n}{r c_p} \frac{g(1 + r_{cp} / r_a)}{\Delta + g(1 + r_{cp} / r_a)} - \frac{e_a^* - e_a}{\Delta + g(1 + r_{cp} / r_a)} \quad (8)$$

A relação entre os valores de $T_c - T_a$ e VPD obtidos em cultura sob boas condições de umidade do solo produz um limite inferior de $T_c - T_a$, que é conhecido como linha de base inferior (sem estresse). Admitindo-se que a resistência da cultura é nula ($r = 0$) e substituindo-se esse valor na equação 6, obtém-se a linha de base inferior:

$$(T_c - T_a)_i = \frac{r_a R_n}{r c_p} \frac{g}{\Delta + g} - \frac{(e_a^* - e_a)}{\Delta + g} \quad (9)$$

A linha de base superior pode ser determinada supondo-se que a resistência da cultura aumente **sem limite, isto é, $r \rightarrow \infty$** . Substituindo esse valor na equação 6, têm-se:

$$(T_c - T_a)_s = \frac{r_a R_n}{r c_p} \quad (10)$$

O CWSI foi então calculado utilizando-se a seguinte expressão:

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_i}{(T_c - T_a)_s - (T_c - T_a)_i} \quad (11)$$

em que $(T_c - T_a)$ é a diferença de temperatura obtida com o termômetro a infravermelho portátil ($^\circ C$), $(T_c - T_a)_i$ a linha de base inferior ($^\circ C$) e $(T_c - T_a)_s$ a linha de base superior ($^\circ C$).

A resistência aerodinâmica (r_a) foi determinada pela equação 10, considerando o maior valor obtido de $T_c - T_a$ na parcela não irrigada. A resistência da cultura à evapotranspiração potencial (r_{cp}) foi estimada resolvendo a equação 8 em função de r_{cp} e utilizando $T_c - T_a$ obtida no T1.

A produção de grãos foi avaliada colhendo-se as vagens de soja de uma área útil de $100m^2$. A colheita foi realizada manualmente, determinando-se a umidade dos grãos e corrigindo-se o peso final para 13% de umidade.

Resultados e discussão

Na Tabela 1 encontram-se os valores médios das lâminas de água (mm) aplicadas pelas irrigações e as alturas pluviométricas medidas durante o desenvolvimento do experimento. As parcelas dos tratamentos receberam, por meio das irrigações, no período de 44 a 113 dias após a emergência (d.a.e.), lâminas totais de água de 131, 105, 131 e 26mm (irrigação inicial aos 29 d.a.e.), distribuídas em seis, cinco e quatro irrigações, respectivamente para T1, T2, T3 e T4. Em

todo o ciclo da cultura as lâminas foram 436,7; 410,7; 436,7 e 305,7mm (irrigação mais chuva), respectivamente para os tratamentos T1, T2, T3 e T4. Verifica-se que T1 e T3 receberam a mesma quantidade de água, variando apenas o número de irrigações efetuadas, enquanto T2 foi o que obteve a menor quantidade de água por meio artificial.

As maiores lâminas de água utilizadas no experimento se encontram em T3, em decorrência aos maiores intervalos que ocorreram entre as irrigações desse tratamento. Os intervalos médios entre as irrigações foram 8,4; 8,8 e 14,5 dias, respectivamente, para T1, T2 e T3. A altura pluviométrica total resultante das chuvas ocorridas no período do ciclo da cultura foi 279,7mm.

A Figura 1 apresenta os valores médios da radiação líquida e déficit de pressão de vapor do ar ocorridos durante o período das amostragens, entre 12 e 13 horas. Os valores de radiação líquida variaram, na maior parte do tempo, entre 500 e 650W m², com valor médio de 504W m² e desvio padrão dos dados de 130W m². A maior quantidade de radiação recebida pela vegetação foi 645W m² e a menor 115W m², ocorridas aos 90 e 64 d.a.e., respectivamente. O déficit de pressão de vapor variou de 2,38 a 0,13kPa, com um valor médio de 1,20kPa e desvio padrão dos dados de 0,55kPa. O maior valor ocorreu aos 55 d.a.e. quando a temperatura média (12 às 13 horas) do ar

foi 32,2 °C, uma das maiores temperaturas que ocorreram durante o desenvolvimento do experimento. A variação diária dos valores de déficit de pressão de vapor apresentou tendência semelhante aos de radiação líquida.

A temperatura média (Figura 2) durante o período das amostragens foi 26,2°C com desvio padrão dos dados de 3,7°C, apresentando a máxima temperatura aos 54 d.a.e. (32,3°C) e a mínima aos 66 d.a.e. (16,4°C). A velocidade média do vento no período das amostragens foi 1,41m s⁻¹, com desvio padrão dos dados de 0,59m s⁻¹. A velocidade do vento não ultrapassou 2,51m s⁻¹, caracterizando a ocorrência de ventos fracos durante o desenvolvimento do experimento. A não ocorrência de valores de velocidade de vento menores do que 0,4m s⁻¹ é resultado da força de inércia do anemômetro utilizado nas medições.

A água disponível na camada do solo de 0 a 60cm para todos os tratamentos é mostrada na Figura 3, observando-se que com exceção do tratamento T4, os demais apresentaram um esgotamento máximo da reserva utilizável de água no solo em torno de 50%, o qual segundo DOORENBOS & PRUITT (1976), é considerado, para a cultura da soja e nas condições ambientais em que foi desenvolvido esse experimento, uma disponibilidade hídrica que permite a cultura transpirar a sua taxa potencial. As lâminas de água aplicadas por intermédio das irrigações, nos tratamen-

Tabela 1. Valores médios (mm) das lâminas de água aplicadas nas parcelas de cada tratamento e precipitações ocorridas durante o experimento com soja, em Jaboticabal, SP, 1993.

d.a.e.*	Altura pluviométrica (mm)	Irrigações (mm)			
		T1	T2	T3	T4
1 a 45	108,6	26	26	26	26
46		11			
53			20		
57		16			
64		22	19	41	
71		34			
73			30	42	
81	0,5				
85		48			
88			36		
93				48	
97	11,5				
101	9,4				
105	8,3				
106	8,6				
106 a 142	132,8				
Total	279,7	157	131	157	26

*d.a.e. – dias após a emergência.

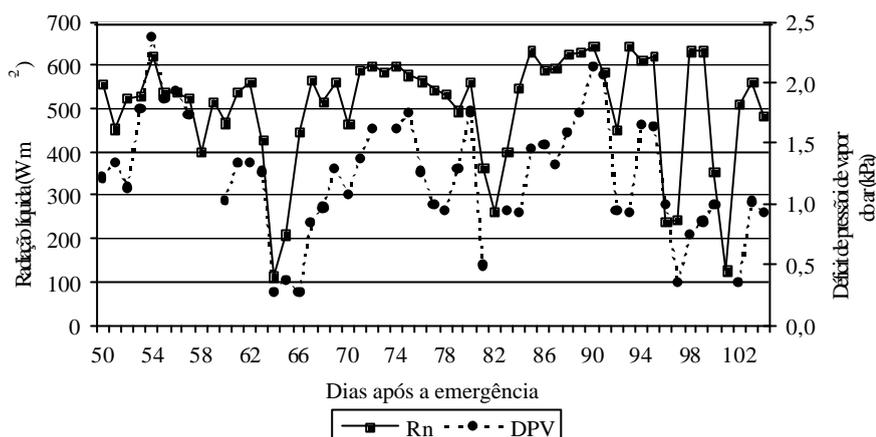


Figura 1. Valores médios da radiação líquida (Rn) e déficit de pressão do vapor do ar (DPV) ocorridos entre 12 e 13 horas, durante o desenvolvimento do experimento com soja, em Jaboticabal, SP.

tos T1 e T2 não foram suficientes para repor a umidade do solo à capacidade de campo. As irrigações efetuadas nas parcelas desses dois tratamentos conseguiram repor, no máximo, 75 e 77% da CAD, respectivamente, enquanto que para T3 as duas últimas irrigações efetuadas elevaram a umidade do solo à 98 e 94% da CAD. O tratamento T3, embora tenha apresentado maior conteúdo de água no solo, foi o que mostrou maior variação nos valores de umidade, tendo em vista os maiores intervalos entre as irrigações. A eficiência das irrigações foi maior no T3 do que nos outros dois tratamentos, podendo esse fato ser devido à quantidade de água aplicada, tendo em vista que a metodologia empregada para determinar as lâminas de água foi a mesma para todos os tratamentos. No tratamento T3 a quantidade de água utili-

zada em cada irrigação foi maior, fato esse que poderia ter facilitado maior infiltração de água através da vegetação e, portanto, maior volume de água atingindo o solo, além do que, a quantidade de água retida pela cobertura vegetal corresponderia a uma pequena porcentagem do total, em função do maior volume. Nos outros dois tratamentos, com menores lâminas aplicadas, a quantidade de água retida pela vegetação e evaporada corresponderia a uma porcentagem maior, em função do menor volume utilizado. Os valores médios da reserva de água do solo foram 60, 61, 73 e 39%, com desvio padrão dos dados de 9,1, 9,0, 15,2 e 13,4%, respectivamente, para T1, T2, T3 e T4. Nota-se que T1 e T2 apresentaram valores próximos e T3 o maior valor, porém a variação dos dados ocorrida nesse último foi bem maior do que os dois primeiros. O tratamento T4 apresentou um decréscimo da água disponível no solo em função do tempo, tendo em vista não ter recebido nenhum aporte via irrigação, mostrando a menor porcentagem em relação aos outros.

Os valores médios de $T_c - T_a$, obtidos em todos os tratamentos, em relação ao déficit de pressão de vapor do ar são mostrados na Figura 4. Observa-se que a maior diferença entre as temperaturas foi 6,9°C (90 d.a.e.), registrada no tratamento T4, e a menor -2,62°C (57 d.a.e.), em T1. Os valores do déficit de pressão de vapor do ar atmosférico situaram-se entre 0,28 e 2,4kPa.

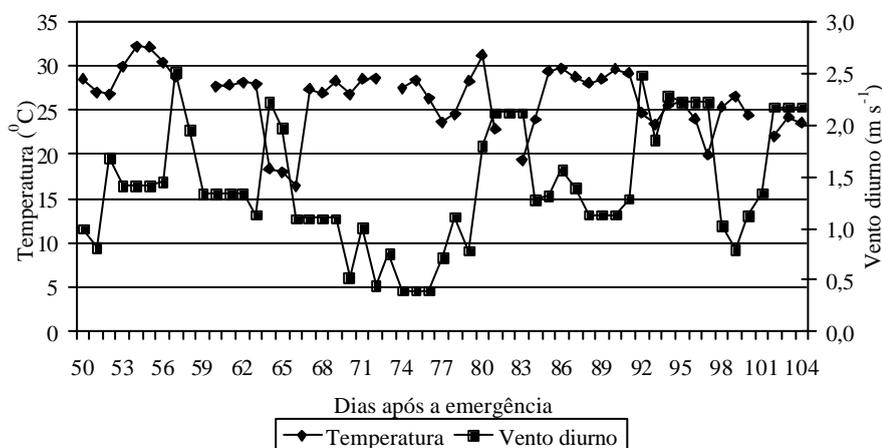


Figura 2. Valores médios da temperatura do ar e velocidade do vento ocorridos durante o desenvolvimento do experimento com soja, em Jaboticabal, SP.

zada em cada irrigação foi maior, fato esse que poderia ter facilitado maior infiltração de água através da vegetação e, portanto, maior volume de água atingindo o solo, além do que, a quantidade de água retida pela cobertura vegetal corresponderia a uma pequena porcentagem do total, em função do maior volume. Nos outros dois tratamentos, com menores lâminas aplicadas, a quantidade de água retida pela vegetação e evaporada corresponderia a uma porcentagem maior, em função do menor volume utilizado. Os

Os valores médios de $T_c - T_a$, obtidos em todos os tratamentos, em relação ao déficit de pressão de vapor do ar são mostrados na Figura 4. Observa-se que a maior diferença entre as temperaturas foi 6,9°C (90 d.a.e.), registrada no tratamento T4, e a menor -2,62°C (57 d.a.e.), em T1. Os valores do déficit de pressão de vapor do ar atmosférico situaram-se entre 0,28 e 2,4kPa.

Na Figura 5 encontra-se a regressão linear entre $T_c - T_a$, obtida nas parcelas com plantas em conforto hídrico (T1), com o déficit de pressão de vapor do ar. Obteve-se pela equação de regressão ($r^2 = 0,7$) um coeficiente angular igual a -2,9768 e o linear -1,0936, valores diferentes daqueles relatados por IDSO et al. (1981) para a cultura da soja

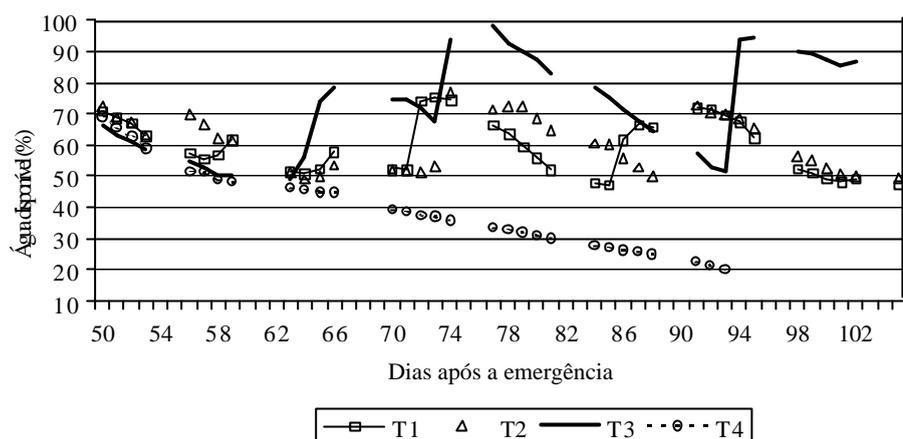


Figura 3. Água disponível no solo, até a profundidade de 0,60 m, para os tratamentos T1, T2, T3 e T4, em Jaboticabal, SP.

(-0,134 e 1,48). Para estabelecer essa regressão foram utilizados os valores de $r_a = 11,8 \text{ s m}^{-1}$ e $r_{cp} = 6,5 \text{ s m}^{-1}$, obtidos com as equações 10 e 8, respectivamente. A equação de regressão foi utilizada para a determinação da linha de base inferior. A maior diferença entre as temperaturas da cobertura vegetal e do ar, obtida no tratamento sem irrigação, foi considerada como linha de base superior.

Na Figura 6 são apresentados os valores médios de CWSI, para todos os tratamentos, verificando-se que, geralmente, T1 apresentou valores menores do que os outros tratamentos, sendo seguido por T2, T3 e T4, nessa ordem. Os dados de T1 exibiram tendências semelhantes à T2 e os valores de CWSI para ambos tratamentos não ultrapassaram 0,60. Os valores médios de CWSI foram 0,41, 0,44, 0,49 e 0,69,

respectivamente. Os valores de CWSI sempre decresceram após ocorrências de chuvas ou irrigações, notando-se que em T1, apenas a irrigação efetuada aos 71 d.a.e. não diminuiu o índice para um valor próximo a 0,2, verificando-se que nessa data foi aplicada a segunda maior lâmina de água. Os valores de CWSI em T2 decresceram próximo a 0,3 após as irrigações, ao passo que em T3 a lâmina de água aplicada aos 64 d.a.e. foi a que produziu o menor valor do índice (0,33). No T3, mesmo com as maiores lâminas de água aplicadas, os valores de CWSI foram maiores, indicando que não houve a completa recuperação da planta quanto ao estresse a que foi submetida. Considerando o valor médio de CWSI e o desvio padrão dos dados do tratamento T1 (maior frequência de irrigação), assumiu-se um limite de 0,50 para verificar o número de ocorrências acima desse valor. Para o

tratamento T1, os valores de CWSI foram maiores do que 0,50 em sete dias, para T2 em doze e para T3, em dezoito dias. Os dados de CWSI obtidos em T4 mostraram, geralmente, valores superiores aos dos outros tratamentos e as variações ocorridas são consequência das condições ambientais reinantes durante o experimento (radiação, nebulosidade e chuvas).

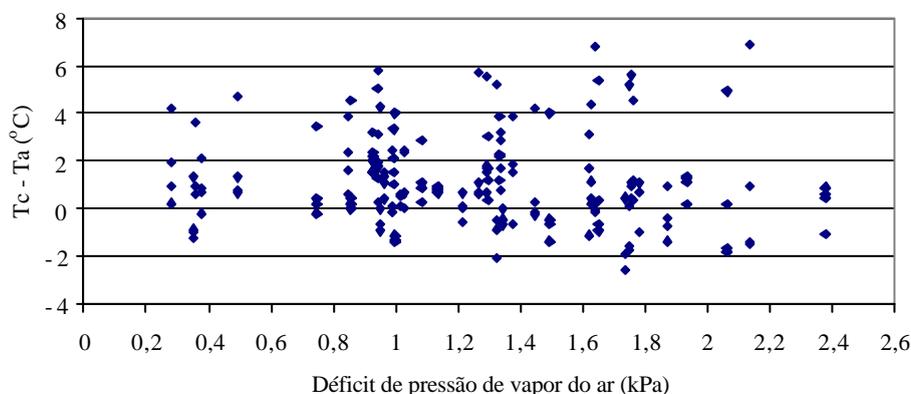


Figura 4. Valores médios de $T_c - T_a$ em relação ao déficit de pressão de vapor do ar, obtidos em todos tratamentos, durante o desenvolvimento do experimento, em Jaboticabal, SP.

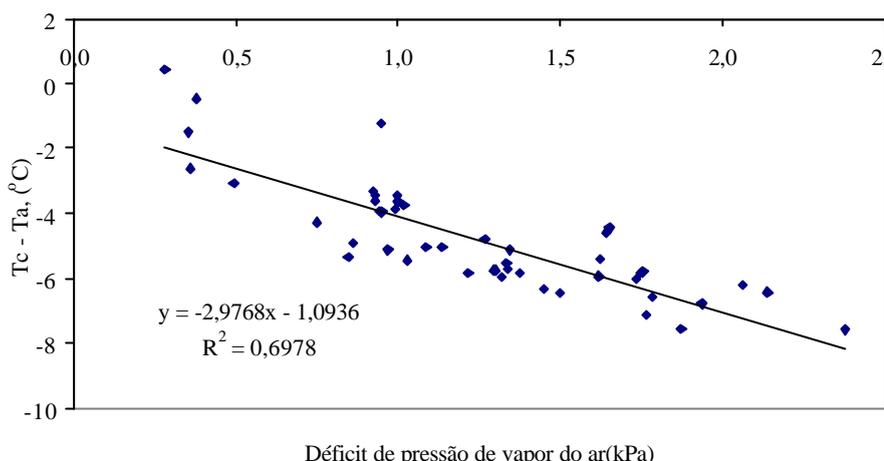


Figura 5. Regressão linear entre os valores de $T_c - T_a$, obtidos no tratamento T1, e déficit de pressão de vapor do ar, em Jaboticabal, SP.

Os valores de produtividade de grãos (kg ha^{-1}) encontram-se na Tabela 2, verificando-se que T1 foi o mais produtivo, ao passo que os rendimentos de T2, T3 e T4 corresponderam a 92, 72 e 22% em relação a T1. Observa-se uma pequena diferença entre T1 e T2, mas grandes diferenças entre esses tratamentos e T3 e T4. Apesar de T3 ter recebido a mesma quantidade de água do que T1, apresentou 28% a menos na produção de grãos, indicando que a quantidade de água não foi limitante para a maior produtividade, mas sim a frequência de irrigação. O esgotamento de água no solo em T3 não ultrapassou 50%

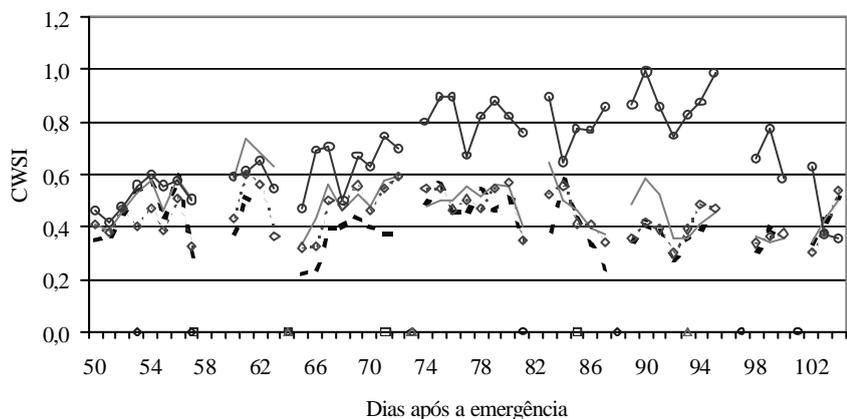
do que T1 e T2, caracterizando, então, a menor produtividade obtida em relação a esses dois tratamentos. Considerando que o valor médio de CWSI para T3 foi 0,49 e o desvio padrão dos dados 0,10, obtém-se um valor de 0,59, ao passo que para T1 esse valor é de 0,50. Portanto, pode-se considerar 0,50 como o limite de CWSI para obtenção da maior produtividade, valor diferente ao relatado por GARROT et al. (1994).

Conclusões

O método para determinação de CWSI utilizado nesse experimento mostra-se eficiente para detectar estresse hídrico na cultura da soja. A água disponível no solo não é um bom indicador para avaliação do tratamento mais produtivo. Para obtenção de maior produtividade pode-se sugerir um valor limite de CWSI de 0,50.

Referências bibliográficas

ALOISI, R.R., DEMATTÊ, J.L.T. Levantamento dos solos da Faculdade de Medicina Veterinária e Agronomia de Jaboticabal. **Científica**, Jaboticabal, v. 2, p. 123-136, 1974.



■ T1 ● T2 ▲ T3 ○ T4 □ Ir T1 ◇ Ir T2 △ Ir T3 ○ Chuva

Figura 6. Valores médios de CWSI, para todos os tratamentos e datas das irrigações e ocorrências de chuvas durante o desenvolvimento do experimento, Jaboticabal, SP.

- ANDRÉ, R.G.B., VISWANADHAM, Y. Radiation balance of soybeans grown in Brazil. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 30, p. 157-173, 1983.
- ANDREWS, P.K., CHALMERS, D.J., MOREMONG, M. Canopy-air temperature differences and soil water as predictors of water stress of apple tree grown in a humid, temperate climate. **Journal of American Society of Horticultural Science**, St. Joseph, v. 117, n. 3, p. 453-458, 1992.
- DOORENBOS, J., PRUITT, W.O. **Las necesidades de agua de los cultivos**. Roma: FAO, 1976. 193 p. (FAO, Riego e Drenaje 124).
- GARDNER, B.R., NIELSEN, D.C., SHOCK, C.C. Infrared thermometry and the crop water stress index. II. Sampling procedures and interpretation. **Journal of Production Agricultural**, Madison, v. 5, n. 4, p. 466-475, 1992.
- GARROT Jr., D.J., OTTMAN, M.J., FANGMEIER, D.D. et al. Quantifying wheat water stress with the crop water stress index to schedule irrigation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, p. 195-199, 1994.
- GENUCHTEN, M. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 41, p. 892-898, 1980.
- IDSO, S.B., JACKSON, R.D., REGINATO, R.J. Extending the "degree day" concept of plant phenological development to include water stress effects. **Ecology**, New York, v. 59, p. 431, 1978
- IDSO, S.B., JACKSON, R.D., PINTER, P.J. et al. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 24, p. 45-55, 1981.
- IDSO, S.B., REGINATO, R.J. Soil and atmosphere-induced plant water stress in cotton as inferred from foliage temperatures. **Water Resource Research**, Washington, v. 18, p. 1143-1148, 1982.
- JACKSON, R.D. Canopy temperature and crop water stress. In: HILLEL, D. **Advances in irrigation**, New York, Daniel Hillel, v. 1, 1982, p. 43-80.
- JACKSON, R.D., IDSO, S.B., REGINATO, R.J. et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator. **Water Resources Research**, Washington, v. 17, n. 4, p. 1133-1138, 1981.
- JACKSON, R.D., KUSTAS, W.P., CHOUDHURY, B.J. A reexamination of crop water stress index. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 9, n. 4, p. 309-317, 1988.
- JACKSON, R.D., REGINATO, R.J., IDSO, S.B. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. **Water Resources Research**, Washington, v. 13, n. 3, p. 651-656, 1977.
- JONES, H.G. Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 95, p. 139-149, 1999.
- KATERJI, N., HALLAIRE, M. Les grandeurs de référence utilisables dans l'étude de l'alimentation en eau des cultures. **Agronomie**, Paris, v. 4, n. 10, p. 999-1008, 1984.
- KHERA, K.L., SANDHU, B.S. Canopy temperature of sugarcane as influenced by irrigation regime. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 37, p. 245-258, 1986.
- NAKAYAMA, F.S., BUCKS, D.A. Crop water stress index, soil water, and rubber yield relations for the guayule plant. **Agronomy Journal**, Madison, v. 76, n. 5, p. 791-794, 1984.
- PEÑUELAS, J., SAVÉ, R., MARFÀ, O. et al. Remotely measured canopy temperature of greenhouse strawberries as indicator of water status and yield under mild and very mild water stress conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 58, p. 63-77, 1992.
- RICHARDS, L.A. A pressure membrane extraction apparatus for soil solution. **Soil Science**, Baltimore, v. 51, p. 377, 1941.
- STEGMAN, E.C., SODERLUND, M. Irrigation scheduling of spring wheat using infrared thermometry. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 35, n. 1, p. 143-152, 1992.
- Van BAVEL, C.H.M., EHRLER, W.L. Water loss from a sorghum field and stomata control. **Agronomy Journal**, Madison, v. 60, p. 84-86, 1968.
- WALKER, G.K., HATIFIEL, J.L. A test of the stress-degree-day concept using multiple planting dates of red kidney beans. **Agronomy Journal**, Madison, v. 71, p. 967-971, 1979.

Tabela 2. Produtividade média de grãos de soja, porcentagem em relação ao tratamento mais produtivo e lâmina total de água recebida pelos tratamentos, Jaboticabal, SP.

Data da colheita	Tratamento	Lâmina total de água (mm)	Produtividade (kg ha ⁻¹)	Porcentagem (%)
20/9/93	T1	436,7	2120	100,0
20/9/93	T2	410,7	1946	91,8
20/9/93	T3	436,7	1516	71,5
02/9/93	T4	305,7	474	22,4