

L.A.M. LUCHT, C.C. GHIZONI

INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS

CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS - S.P. - BRASIL

RESUMO

A diferença de temperatura entre organismos vegetais e o ar é uma função dos fatores fisiológicos e ambientais. Estágios de desenvolvimento, carga genética, níveis hídricos e nutricionais, idades, etc. são fatores que diferentemente atuam sobre as resistências a difusão térmica interna ( $R_f$ ) e externas ( $R_a$ ) das plantas. Um valor de  $R_a$  define o tipo de cultura pois, este parâmetro, é função principalmente da forma geométrica, tamanho e espessura da folha. Uma mesma cultura, no entanto, pode apresentar diferentes valores de  $R_f$ , dependendo do seu estado de fitossanidade. A dependência da temperatura em relação aos parâmetros fisiológicos e ambientais sugere a viabilidade do uso de imagens termais, como indicativo do estado de normalidade e classificação de culturas. Baseados em cálculos teóricos da temperatura das plantas [1] fez-se, no presente trabalho, um estudo comparativo entre diversas culturas e estado de normalidade. Uma ênfase especial é dada à cultura de cana-de-açúcar, dada a sua importância atual no país. No gênero *Saccharum* estudou-se a influência do potencial de água na alteração da temperatura da planta. Apresentam-se dados experimentais obtidos a nível de campo e aeronaves. Os resultados comprovam as previsões e indicam a possibilidade de detecção da necessidade hídrica, através do uso de imagens termais.

A identificação e classificação de culturas por Sens  
oriamento Remoto é de grande importância na estimativa de produção.  
Atualmente, toda a classificação é feita com imagens obtidas na região  
do visível e infravermelho próximo (LANDSAT) e, a extensão para ou  
tras regiões espectrais é altamente desejável, dadas as deficiências  
inerentes, impostas pelo emprego de uma faixa espectral limitada. Di  
ferentes microclimas, plantas ou mesmo diferenças organo-funcionais nu  
ma mesma cultura fazem com que estas, comumente, apresentem temperatu  
ras distintas. Isto nos sugere a viabilidade do uso de imagens ter  
mais como complemento na estimativa de produção.

Todos os objetos a temperaturas acima de zero grau abso  
luto emitem energia. Para os organismos biológicos esta emissão está  
compreendida inteiramente na região do infra-vermelho termal. No en  
tanto, as características peculiares do emissor, como superfície e  
constante de emissividade ( $\epsilon$ ), determinam a eficiência com que esta  
radiação é projetada ao meio. A lei que quantifica a radiação (watts/  
 $\text{cm}^2$ ) é equacionada por  $R = \epsilon \sigma T^4$  onde  $T$  é a temperatura absoluta,  $\sigma$ ,  
é a constante de Stefan-Boltzmann e  $\epsilon$  é a constante de emissividade mē  
dia na região espectral considerada.

O Sensoriamento Remoto, atuando através da detecção da  
radiação térmica, possibilita inferir sobre a temperatura real dos al  
vos, ao contrário dos métodos convencionais de medidas de temperatu  
ra, que envolvem sérios problemas de amostragem, além de possibilita  
rem o aumento do erro experimental de medida pela interferência dire  
ta do instrumento com o alvo.

A origem da radiação detectada pelo aparelho sensor va  
ria de acordo com a região espectral que se considera no experimento.  
Para as plantas, na região do visível e infra-vermelho próximo, é pre  
dominante a radiação refletida. Como normalmente trabalha-se com plan  
tas verdes, relaciona-se a intensidade de radiação refletida a quanti

dade de pigmentos na planta, embora se saiba que a perda de clorofila também pode estar associada a outras causas, como maturação, salinidade e doenças. Entretanto, reflectância por si só é um parâmetro insuficiente para avaliar determinadas culturas.

Com o aumento do comprimento de onda, a quantidade de radiação refletida diminui, tornando-se cada vez maior a radiação emitida que é, como se viu uma função da temperatura da superfície e da emissividade das plantas. Ao se tentar usar o parâmetro emissividade para a identificação ou classificação de plantas, através de imagens obtidas na região espectral do termal, encontra-se uma limitada utilidade da variável, pois os vegetais, pelas suas estruturas moleculares complexas, tem emissividade aproximadamente igual a um. Isto nos indica que a temperatura assume importância fundamental na avaliação de culturas através de imagens termais.

A magnitude e direção das trocas de calor por convecção (C), por mudanças de fase da água presente na planta ( $\lambda E$ ) e por emissão da radiação (R) são determinadas pela temperatura da planta, sendo que esta age diferentemente sobre cada um dos componentes (C,  $\lambda E$  e R) dos processos de transferência de calor. A convecção e condução são proporcionais à diferença de temperaturas entre planta e meio. A pressão de saturação segue uma lei exponencial e a perda de calor por radiação, no infravermelho, aumenta com a 4ª potência da temperatura.

A planta, por ser um organismo que transforma ou processa a radiação solar em matéria, apresenta sua temperatura ( $T_f$ ) diferente da temperatura do ar ( $T_a$ ). A esta diferença de temperatura existente denominamos de  $\delta T$ , que é causa do contínuo processamento das funções vitais. A determinação da temperatura da planta e de como a mesma depende dos diversos fatores envolvidos nos processos fisiológicos, é portanto de grande importância, e essencial para o entendimento da interação planta-ambiência.

Foi através da solução da equação do balanço energético, [1] que se chegou ao conhecimento do valor da temperatura da planta ( $T_f = T_a + \delta T$ ), em função de fatores fisiológicos e ambientais. A temperatura ambiente, a pressão de vapor nesta temperatura  $P_{cl}$ , e a umidade relativa ( $\mu$ ) são fatores que obviamente afetam a planta. Sem dúvida, o fluxo solar diário e a emissão da radiação são os fatores ambientais mais importantes.

Os fatores fisiológicos que influem na temperatura das plantas traduzem seus efeitos através das resistências de difusão térmica da folha ( $R_f$ ) e do ar ( $R_a$ ). A resistência de difusão térmica do ar ( $R_a$ ) é função da espessura, tamanho e forma geométrica da folha. Assim, cada cultura apresenta um valor de  $R_a$  que a caracteriza e, acarreta diferentes temperaturas. Por sua vez, a resistência de difusão térmica da folha é função de fatores tais como: doenças, disponibilidade de água, estado nutricional, estágio de desenvolvimento, idade e etc. Existem referências teóricas de que o par de valores  $R_a$ ,  $R_f$  é fundamental para o Sensoriamento Remoto, na avaliação e interpretação do estado geral da cultura, através de imagens termais, uma vez que a temperatura das plantas, como se vê, é alterada por estes dois fatores e a inferência automática da condição de normalidade é viável através da determinação de  $R_f$ . Para comprovar estas afirmações teóricas escolheu-se um dos fatores fisiológicos que tem grande influência em  $R_f$ , ou seja, o potencial de água na planta ( $\psi_{planta}$ ), que por sua vez está relacionado à quantidade de água no solo ( $\theta_v$ ). Como cultura, foi selecionada para o experimento, a cana-de-açúcar, dado que as grandes extensões das lavouras propiciam desuniformidades quanto à necessidade hídrica, que é um dos principais fatores limitantes da cultura. O gênero *Saccharum* ocupa uma posição de destaque no Brasil, visto que o governo, recentemente, fixou uma percentagem de álcool para a mistura carburante, buscando uma atenuação e provisão ao problema de energia do país.

Sabe-se que a seca induz o fechamento dos estômatos. Para a detecção remota desta alteração, na cultura de cana-de-açúcar, foi estabelecido, na Estação Experimental da Copersúcar, uma área teste de 150 m x 150 m, plantada com cana de variedade CB-5398. Medidas de temperatura de radiação no campo, foram tomadas com um Termômetro de Radiação de Precisão Modelo PRT-5. Este radiômetro é sensível na faixa espectral de 8-14 $\mu$  justamente onde corpos, na temperatura ambiente, emitem um máximo de radiação. Para a verificação da homogeneidade termal da cultura em função do horário do dia, realizou-se um estudo preliminar onde coletaram-se dados de temperatura de radiação e radiação solar, em períodos diurnos. Pode-se observar que a cana-de-açúcar apresenta uma boa uniformidade quanto à resposta da temperatura da radiação. Na Figura I verifica-se que o máximo do fluxo solar não coincide com o máximo de temperatura de radiação. Nesta figura, o eixo das abscissas representa o tempo (em horas), e o eixo das ordenadas a temperatura e o fluxo solar normalizados.

Realizada a fase inicial do experimento do talhão 150 x 150 m foi irrigada a área de 150 x 18 m para proporcionar teores favoráveis de umidade pelo sistema de aspersão, cada vez que o teor de umidade do solo chegava a 50% da capacidade de campo enquanto que a área restante serviria de comparação. A quantidade de água aplicada em cada irrigação, totalizou 30.6 mm considerando, uma eficiência de irrigação de 75%, evapotranspiração 3,0 mm/dia, capacidade de campo 21,0%, ponto de murchamento 13,2% e peso específico de 1,21g/cm<sup>3</sup>. Aos 136 dias da data da primeira colheita da cana, medidas de umidade de solo, bainha e temperatura foram tomadas. Neste espaço de tempo a precipitação foi de 225.3 mm. Isto significa que a área irrigada somou 61.2 mm de água a mais que a área não irrigada, pois neste período houve duas aplicações de água. A temperatura média de 21 medidas, foi para a região irrigada de 26.92<sup>o</sup> C enquanto que para a área não irrigada obteve-se 27.67<sup>o</sup> C. Esta diferença de 0.75<sup>o</sup> C entre tratamentos, apesar de pequena, indica que a menor quantidade de água no solo é responsável por uma temperatura maior. A seguir descreve-se a metodologia pe

la qual se provou serem verdadeiras as considerações acima.

As análises dos teores de umidade da bainha mostraram uma variação de 72% a 78% o que corresponde a um potencial de água na planta ( $\psi_{\text{planta}}$ ) de -16 a 19 bars. Para que se pudesse correlacionar os dados de umidade do solo com  $\psi_{\text{planta}}$ , transformaram-se os dados originais, expressos em percentagem de umidade, em dados de conteúdo volumétrico de água no solo ( $\theta_v$ ). Calcularam-se então  $\theta_v$ 's correspondentes a regiões irrigadas e não irrigadas, sendo que seus valores situaram-se entre 0.21 e 0.28, correspondendo a um potencial de água na planta ( $\psi_{\text{planta}}$ ) de -19 a -15.4 bars). Para que uma representação gráfica pudesse ser estabelecida entre  $\psi_{\text{planta}}$  e  $\theta_v$ , determinou-se teoricamente outro valor a ser plotado, baseados no conhecimento científico de que: 1º - À noite,  $\psi_{\text{solo}} = \psi_{\text{planta}}$ , o que corresponde a um  $\theta_v$  determinado valor de  $\theta_v$ . 2º - Ocorre uma variação no  $\psi_{\text{planta}}$  da noite para o dia, de aproximadamente - 10 bars. 3º - O ponto de murchamento de qualquer planta corresponde a um  $\psi_{\text{solo}}$  de aproximadamente -15 a -20 bars. A apresentação do comportamento usual da curva  $\psi_{\text{planta}} \times \theta_v$  em trabalhos anteriores, tornou possível a determinação gráfica para o caso da cana-de-açúcar.

A Figura II ilustra esta representação para a cultura de interesse. Como se sabe, o  $\psi_{\text{planta}}$ , e conseqüentemente  $R_f$ , apresenta uma sensibilidade muito baixa às variações da quantidade de água no solo quando a mesma é relativamente alta (porém abaixo da capacidade do campo). Ver, por exemplo, a tendência geral da curva  $\psi_{\text{planta}} \times \theta_v$ .

Utilizando-se os dados de temperatura ambiente e de radiação, calcularam-se (através da equação  $\delta T = T_f - T_a$ ) os valores médios de  $\delta T$  para os pontos irrigados e não irrigados. Estes resultados encontram-se na Tabela I. Como as diferenças de temperaturas entre folhas e ar ( $\delta T$ ) são decisivamente influenciadas pelo potencial de água na planta ( $\psi_{\text{planta}}$ ), que manifesta seus efeitos através da resistência a difusão térmica na folha ( $R_f$ ), fez-se uso da solução teórica da equação do balanço energético que leva à determinação das temperaturas em função de vários parâmetros e entre eles  $R_f$ , obtendo-se assim valores teóricos de  $\delta T$ . Utilizaram-se, para os parâmetros componentes da equação, os valores reais monitorados por ocasião do experimento. Os dados gerados foram então plotados na Figura III. Posteriormente, situaram-se os valores de  $\delta T$  experimentais na curva  $\delta T \times R_f$ , ficando, portanto, determinadas as resistências de difusão térmica das folhas ( $R_f$ ) de cana irrigada e não irrigada sendo, respectivamente, 1.73 seg/cm e 4.10 seg/cm os valores encontrados.

Pelo fato dos dados de umidade da balsa e solo terem sido coletados simultaneamente, pode-se afirmar que os valores de resistência a difusão térmica das folhas ( $R_f$ ) determinados correspondem aos valores de  $\theta_v$  e  $\psi_{\text{planta}}$ . Ver tabela I. Uma vez que dados experimentais de  $\delta T$  são conseguidos com relativa facilidade e que o objetivo final é relacionar  $\delta T$  com dados de umidade do solo, correlacionaram-se outros valores de  $R_f$  com  $\psi_{\text{planta}}$ . No entanto, considerando que fatores epidemiológicos, além da água, também afetam  $R_f$ , embora com menor intensidade, ou seja esta variável ( $R_f$ ) não depende única e exclusivamente de  $\psi_{\text{planta}}$ , admite-se uma relação entre  $R_f$  e  $\psi_{\text{planta}}$  do tipo:  $R_f = a\psi + b$ , que, resolvida a partir dos dados de  $R_f$  e  $\psi_{\text{planta}}$  para a cultura da cana-de-açúcar, neste trabalho, resultou:  $R_f = - (0.66 \psi + 8.41)$ , equação que permite o relacionamento de  $\delta T$  com  $\psi$ ,  $\theta_v$  ou ainda com a percentagem relativa de água no solo.

Ao observar-se as diferenças de temperatura entre regiões de uma mesma cultura, nota-se a necessidade fundamental de se conhecer a origem das desuniformidades que se traduzem numa diversifi

cação do conjunto de aspectos sobre uma imagem. Um dos principais fatores que contribuem para a falta de homogeneidade no padrão de temperatura é o excesso ou falta de água. Como  $\delta T$  respondeu, no caso da cana, a mudanças no  $\psi_{\text{planta}}$ , o uso deste parâmetro, obtido remotamente, apresenta-se como um método confiável no monitoramento de água. A relação  $\delta T \times \theta_v$  que se conseguiu, pela primeira vez, possibilita a interpretação de imagens termais quantitativa e diretamente sem a recorrência de métodos estatísticos. Em extensas regiões cultivadas, onde está presente a variação do conteúdo volumétrico de água do solo ( $\theta_v$ ), o emprego da relação  $\delta T \times \theta_v$  ou  $\delta T \times \mu_{\text{ag}}$  reduz o trabalho de análise dos dados de umidade, pela completa dispensa da coleta em campo de amostras para estes tipos de determinações. A metodologia desenvolvida permite, portanto, um relacionamento direto da umidade do solo com a temperatura de radiação da cana de açúcar.

Observando-se o gráfico  $\delta T \times \mu_{\text{ag}}$ , (Figura IV) nota-se uma relação não linear relativa às diferenças de temperatura entre a folha, e o ar de  $4.4^{\circ}\text{C}$  a  $5.56^{\circ}\text{C}$  e às umidades das amostras de solo de 7.6% a 18.8%.

A representação gráfica resultante, indica uma redução nos valores de  $\delta T$  quando o conteúdo de água no solo aumenta. Tal comportamento é explicado pela transpiração da planta pois, a uma temperatura constante do ar ( $T_a$ ) e com suficiente água no solo, através do processo endotérmico (transpiração), o vegetal elimina calor a procura de um estado de equilíbrio ( $T_a = T_f$ ), reduzindo, portanto, as diferenças de temperatura entre entidades e ambiência. Note-se que  $\delta T$  apresenta sensibilidade variável com relação às diferentes percentagens de água no solo. Pode-se considerar a existência de quatro distintas regiões, que explicitam a relação entre as duas variáveis, as quais foram denominadas de região de transpiração nula, transpiração parcial, transpiração livre, região de saturação.



As diferenças de temperatura entre a folha e o ar são bastante pronunciada na região ( $\mu_{ag}$ ) entre 18.8% e 15.5%. Como esta região está próxima à capacidade de campo do solo da área experimental (21%), níveis ideais de água estão presentes, propiciando a cultura, condições bastante favoráveis de desenvolvimento, com a transpiração se processando livremente pela total abertura dos estômatos e, portanto, com uma máxima atividade fotossintetizante por parte do vegetal. Indicou-se esta região chamando-a de região de transpiração livre. Subseqüentes perdas de água do solo acarretam uma maior concentração de solutos, provocando o fechamento parcial dos poros estomatais, o que faz com que as diferenças de temperatura entre folha e ar sejam menos acentuadas no intervalo de 11 a 15.5%, dada a ocorrência apenas parcial da transpiração. Tal região é denominada de transpiração parcial. Observando-se o procedimento da curva abaixo do nível de umidade de 11%, nota-se uma saturação, nos valores de  $\delta T$ , numa região em que a transpiração estomatal é nula e, possivelmente, correspondente à região em que as atividades biológicas estão inativadas pela impossibilidade do vegetal retirar água do solo, no ponto de murchamento permanente.

Foi possível verificar que ocorrem "duas alterações" na curva na região de A.D. (água disponível no solo) isto é, para o caso deste experimento compreendida entre 11% e 19% de  $\mu_{ag}$ . (Ver Figura IV) Portanto, baseados na sensibilidade de  $\delta T$  em relação a  $\mu_{ag}$  poder-se-ia dizer que a cana-de-açúcar começa a sentir sinais do estresse causado pela falta de água, ou sentindo desfavoravelmente o potencial negativo na região de umidade do solo de 11% à aproximadamente 15.5%.

Finalmente, fez-se um sobrevôo na Estação Experimental da Copersucar com a aeronave Bandeirante do INPE, equipada com um Imagiador Térmico de Infravermelho. Obteve-se imagens termais nas quais se pode notar diferenças de densidade óptica. Essas diferenças, observadas no talhão em estudo, correspondem às diferenças de temperatura das copas da cana-de-açúcar inferiores a 1°C entre a área irrigada e

não irrigada, comprovando a sensibilidade da cultura ao conteúdo de água do solo. Embora o contraste entre as áreas irrigadas e não irrigadas seja pequeno, pode-se observar que a região mais escura corresponde à cana não irrigada, enquanto a mais clara identifica a cana irrigada. As medidas de temperatura de radiação, tomadas no campo, associadas aos resultados de temperatura obtidos pela plataforma aérea, demonstram a viabilidade do sensoriamento remoto em fazer uso do parâmetro temperatura na avaliação de culturas, através de imagens térmicas, possibilitando detectar, delimitar e verificar a uniformidade da plantação quanto a teores variáveis de umidade no solo. Portanto, o método desenvolvido vem positivar a hipótese inicial.

## BIBLIOGRAFIA

- [ 1 ] LUCHT, L.A.M.; GHIZONI, C.C. *A temperatura das plantas e a avaliação de culturas através de imagens termais.* São Jose dos Campos, INPE, Out. 1978. (INPE-1368-NTI/116).

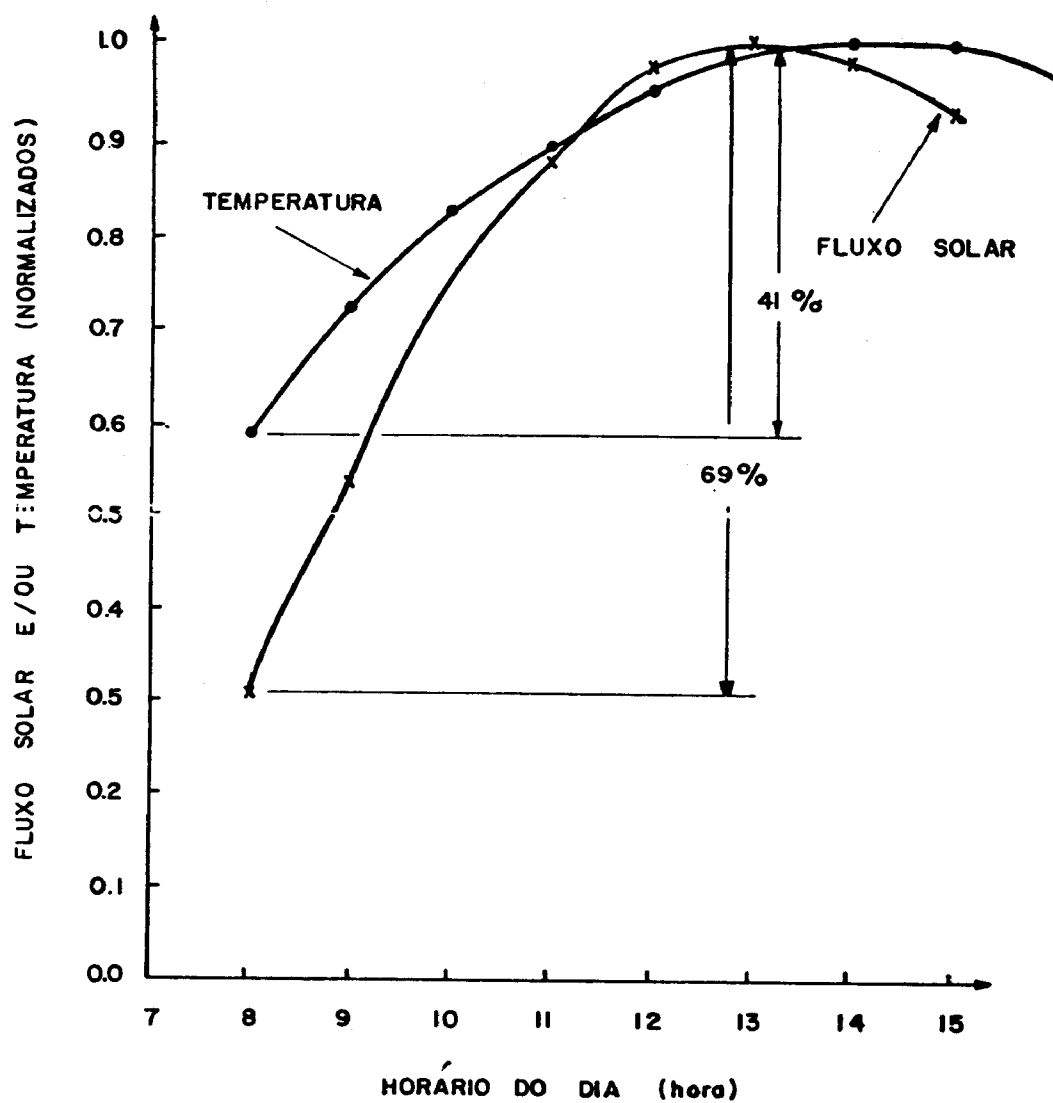


Fig. I - Variação do fluxo solar e/ou temperatura com o horário do dia.

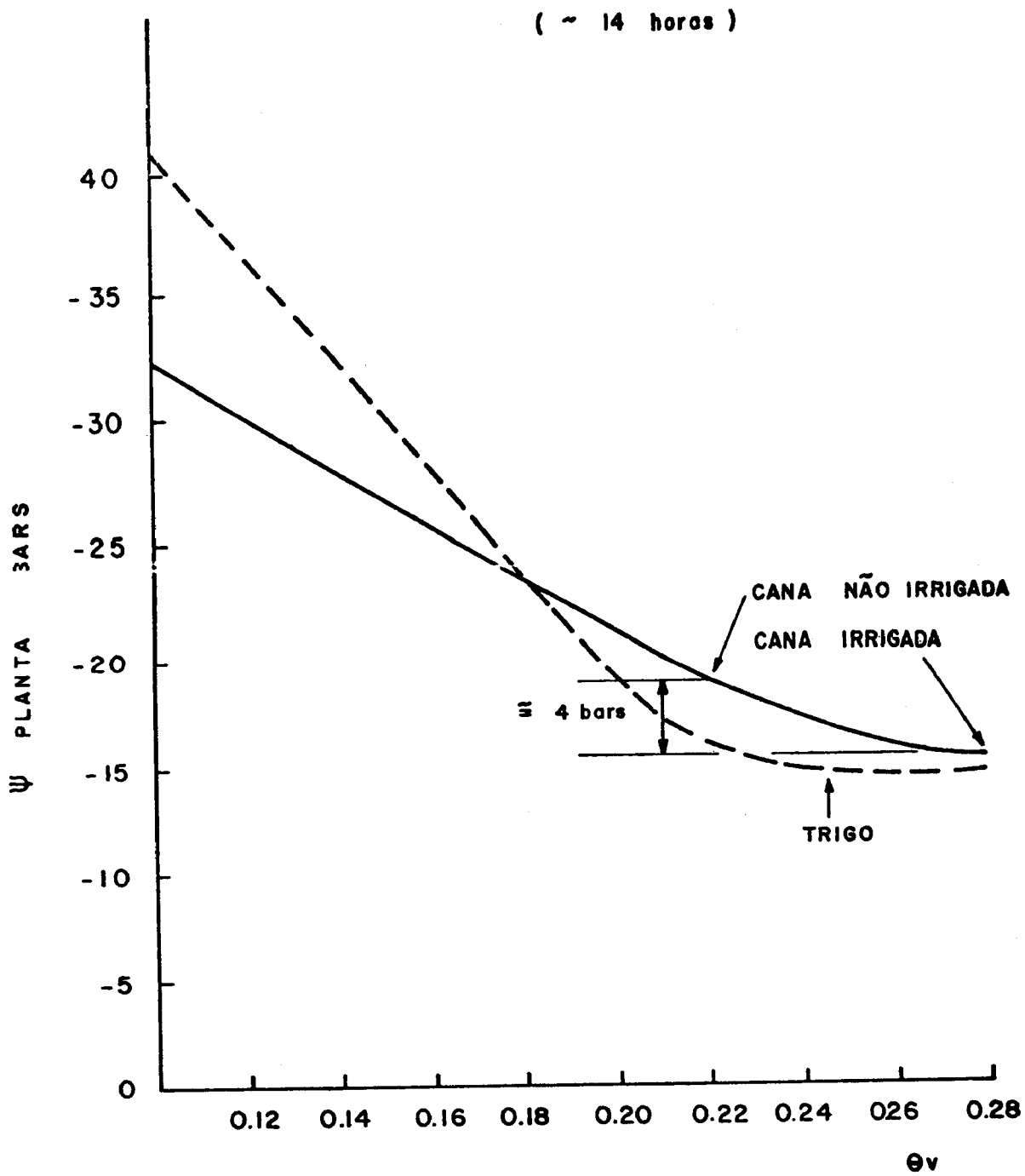


Fig. II - Relação entre o potencial de água da planta e o conteúdo volumétrico de água do solo.

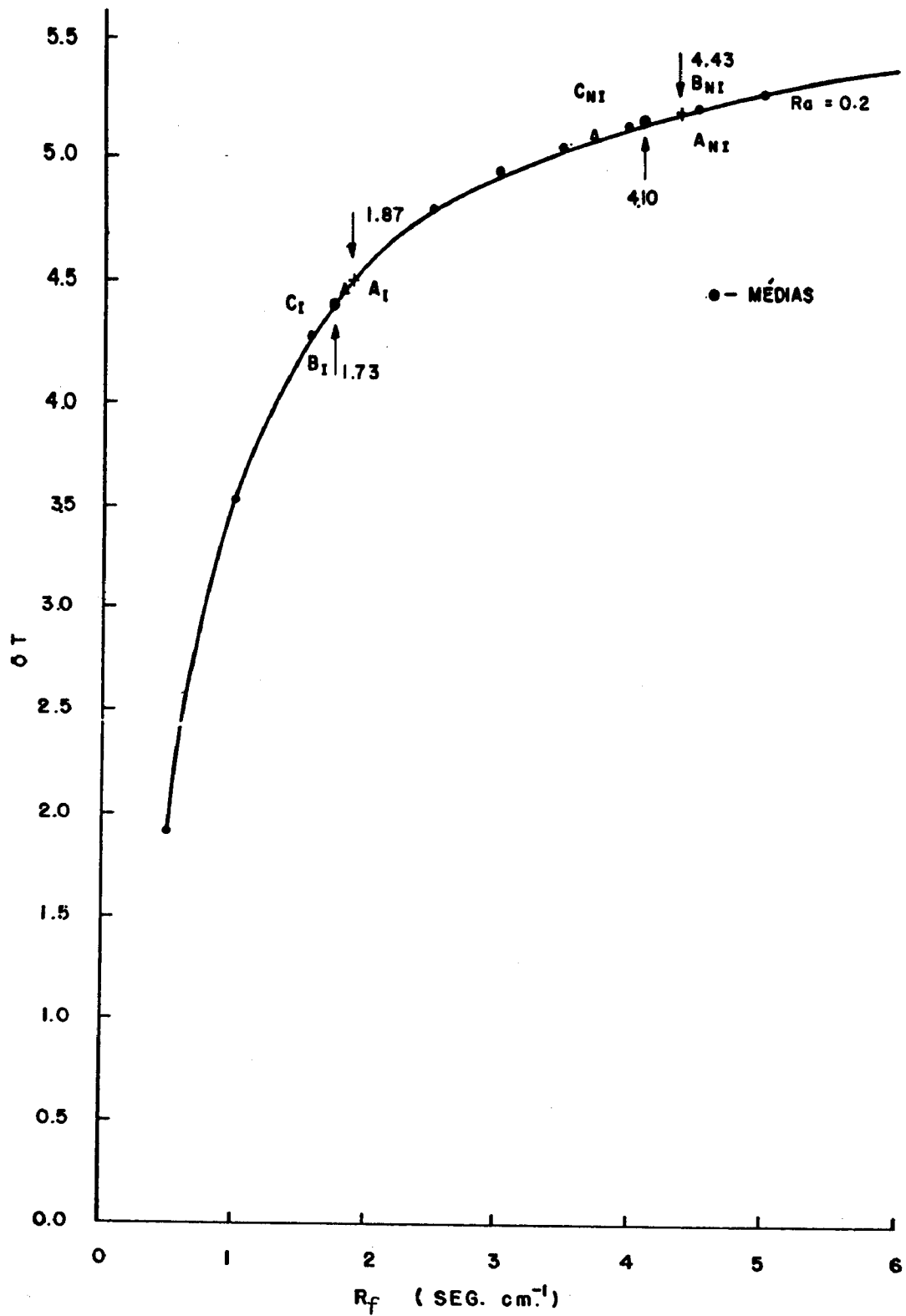


Fig. III - Relação entre a diferença de temperatura entre planta e ar e a resistência de difusão térmica das folhas.

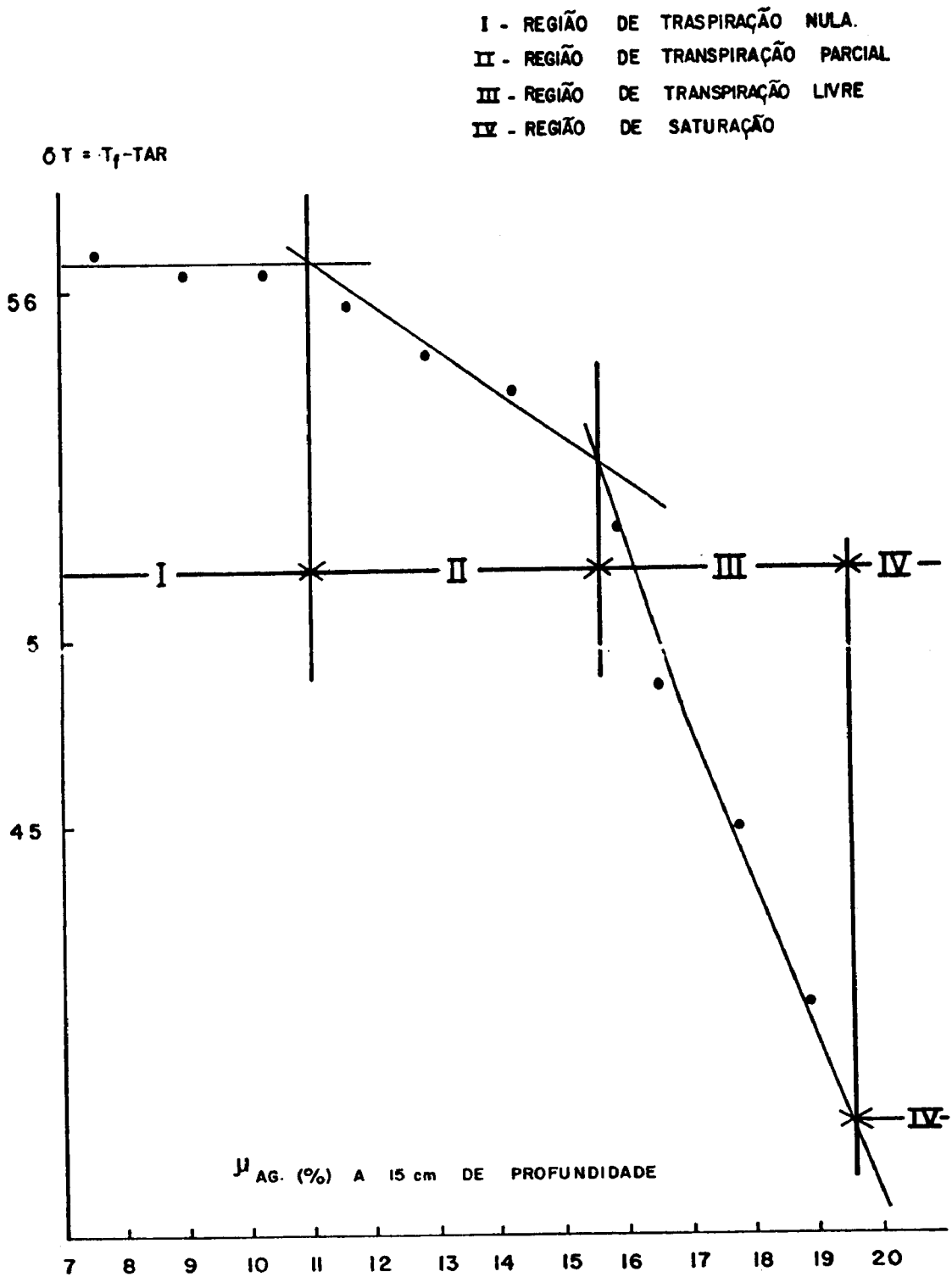


Fig. IV - Relação entre a diferença de temperatura entre planta e ar e a umidade relativa do solo a 15 cm de profundidade.

TABELA I

TABELA DE DADOS EXPERIMENTAIS

TEMPERATURA RA DIAÇÃO 5/7/78	SOLOS (UMIDADE)		QUANTIDADE DE ÁGUA		$\theta_v$ (conteúdo volumétrico de água no solo) $\text{cm}^3 \text{ água} / \text{cm}^3 \text{ solo}$	$\delta T = T_f - T_a$
	(0-15)	(15-30)	(30-45)	5/7/78		
AI 27.00	18.90	19.85	20.07	408.90 mm	561.0	4.4915°
AT 27.14	17.22	18.37	19.20			4.6330
ANI 27.71	15.50	17.64	18.54	225.5 mm	255.0	5.2089
BI 26.93	17.27	18.75	19.18			4.4208
BNI 27.71	16.05	18.51	18.95	225.3 mm	255.0	5.2089
CI 26.97	18.84	20.25	20.40	408.90 mm	561.0	4.4612
CT 27.00	16.87	18.90	18.57			4.4915
CNI 27.57	14.86	17.92	17.96	225.3 mm	255.0	5.0674

$$\langle \delta T_I \rangle = 4.41^\circ\text{C} ; \langle \theta_{VI} \rangle = 0.28 ; \psi_I = -15.4 \text{ bars}$$

$$\langle \delta T_{NI} \rangle = 5.16^\circ\text{C} ; \langle \theta_{VI} \rangle = 0.22 ; \psi_{NI} = -19.0 \text{ bars}$$

$$\Rightarrow R_f = - (0.66 \psi + 8.41)$$