

ISSN 0104-1347

## Transpiração do tomateiro cultivado em estufa plástica e suas relações com a radiação solar e déficit de saturação do ar

Transpiration of tomato grown in plastic greenhouse and relationships with solar radiation and air vapour pressure deficit

Evandro Zanini Righi<sup>1</sup>, Luiz Roberto Angelocci<sup>2</sup>, Galileo Adeli Burio<sup>3</sup> e Arno Bernardo Heldwein<sup>3</sup>

**Resumo** - Determinou-se a transpiração de uma cultivar de tomateiro de hábito de crescimento determinado, cultivada em uma estufa plástica, e sua relação com a radiação solar e o déficit de saturação de vapor d'água do ar na época de outono. O experimento foi conduzido no Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria, em Santa Maria – RS. As variáveis meteorológicas no exterior da estufa foram obtidas na estação meteorológica localizada a 50m ao Sul da mesma, sendo que a densidade de fluxo de radiação solar foi estimada a partir da insolação diária. No centro do interior da estufa, obteve-se a temperatura e a umidade relativa do ar, com um termohigrógrafo instalado no interior de um abrigo meteorológico. Durante o período experimental ocorreu uma gradativa redução do déficit de saturação do ar em função da redução dos níveis de radiação solar, freqüente entrada de frentes frias e ocorrência de nevoeiros. A transpiração diária por unidade de área foliar, medida com lisímetro de drenagem, correlacionou-se linearmente com a densidade de fluxo diário de radiação solar, mas de forma diferente de acordo com a faixa de valores da temperatura média do ar no exterior da estufa. O déficit de saturação diário do ar no interior da estufa foi a variável que melhor se correlacionou com a transpiração diária por unidade de área foliar ( $R^2=0,94$ ), em decorrência do manejo das cortinas da estufa. Essa relação encontrada mostra-se potencialmente útil na estimativa do consumo hídrico do tomateiro crescendo em estufas nas condições de estudo.

**Palavras-chave:** estufa plástica, tomateiro, transpiração, consumo d'água, radiação solar, déficit de saturação do ar.

**Abstract** - In order to assist the water management of tomato crops growing in plastic greenhouse in the region of Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, daily water transpiration was measured with drainage lysimeters, in an autumn-winter tomato crop. A determined growth habit cultivar was used. Meteorological data were measured in a station located 50meters south of the greenhouse. Air humidity and temperature were measured by thermohygrograph inside the greenhouse. Daily transpiration values were correlated linearly with the incoming radiation outside the greenhouse, but with different slopes depending upon the range of air temperature outside the greenhouse. Air vapour pressure deficit was the variable that correlated better with transpiration, and the use of an empirical regression equation between these two variables is potentially useful for water management of the crop growing in the greenhouse during autumn and winter.

**Key words:** Plastic greenhouse, tomato, transpiration, water consumption, solar radiation, vapour pressure deficit.

<sup>1</sup>Engº Agrº, aluno do curso de Pós-Graduação de Física do Ambiente Agrícola. Departamento de Ciências Exatas. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". CP 9, CEP 13418-900, Piracicaba, SP. Bolsista da CAPES. E-mail: [ezrighi@carpa.ciagri.usp.br](mailto:ezrighi@carpa.ciagri.usp.br)

<sup>2</sup>Engº Agrº Dr., Prof. do Departamento de Ciências Exatas. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". CP 9, CEP 13418-900, Piracicaba, SP. Bolsista do CNPq. E-mail: [lrangelocci@carpa.ciagri.usp.br](mailto:lrangelocci@carpa.ciagri.usp.br)

<sup>3</sup>Engº Agrº Dr., Prof. do Departamento de Fitotecnia. Centro de Ciências Rurais. Universidade Federal de Santa Maria. CEP 97119-900, Santa Maria, RS. Bolsista do CNPq. E-mail: [heldwein@ccr.ufsm.br](mailto:heldwein@ccr.ufsm.br)

## Introdução

A determinação da transpiração das plantas cultivadas no interior de estufas plásticas é uma das variáveis mais importantes no manejo das culturas, principalmente no sistema de cultivo em substrato. Nesse sistema, as raízes ficam confinadas num meio que, devido a seu pequeno volume, apresenta baixa quantidade de água armazenada, exigindo maior frequência de irrigações, com volumes de água aplicados de acordo com a demanda evaporativa da atmosfera para evitar desperdícios do próprio recurso e dos nutrientes lixiviados, bem como para evitar o estresse hídrico das plantas.

Desde a implantação do cultivo em estufas plásticas na região de Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul, vem sendo realizados trabalhos voltados ao estudo das modificações do ambiente causadas pelas mesmas e suas possíveis conseqüências sobre o crescimento e desenvolvimento das plantas cultivadas no seu interior (BURIOL *et al.*, 1993, 1997, 2000; SCHNEIDER *et al.*, 1993, 1998; HELDWEIN *et al.*, 1997).

Recentemente, CARON & HELDWEIN (2000) avaliaram a transpiração do meloeiro cultivado em estufa plástica e DALSSASSO *et al.* (1997) e VALANDRO (1999) a transpiração do tomateiro, quando ficou evidente a dificuldade em determinar-se um modelo para estimativa do consumo de água pelas plantas no cultivo de outono-inverno. Essa dificuldade advém do fato que, nesse período, devido a freqüente entrada de frentes frias na região (ESTEFANEL *et al.*, 1990) não ocorre uma boa correlação da radiação solar com a temperatura e o déficit de saturação do ar no interior da estufa (DE VILLELE, 1972; STANGHELINI, 1987). Isto ficou claro no trabalho de VALANDRO (1999), onde a umidade relativa do ar foi a variável que melhor se ajustou aos dados de transpiração do tomateiro cultivado em estufa plástica nesse período.

Nas condições áridas da região Mediterrânea, BOULARD *et al.* (1991) constataram que 40% do total transpirado pelas plantas de tomateiro cultivado em estufa foi devido à componente advectiva da equação de Penman-Monteith, que é regida principalmente pela demanda hídrica atmosférica. No Japão, onde o clima é úmido, OKUYA & OKUYA (1988) encontraram bons ajustes dos dados da transpiração do tomateiro com a radiação solar, com a radiação solar mais o déficit de saturação do ar e,

também, somente com o déficit de saturação do ar. Essas observações mostram a importância do déficit de saturação do ar como uma das variáveis determinantes da transpiração no interior de estufas.

Outro aspecto que interfere decisivamente na transpiração das plantas é a penetração da radiação solar no dossel da cultura (JOLLIET & BAILEY, 1992; BAILLE *et al.*, 1994). Os resultados obtidos até o momento em Santa Maria, foram com híbridos de tomateiro de hábito de crescimento indeterminado, que tem um elevado crescimento apical. Como as cultivares de crescimento determinado são mais prostradas e tem maior ramificação, o coeficiente de extinção é mais elevado para esse material, o que implica maior atenuação da radiação solar pelos diferentes extratos de folhas, modificando a transpiração.

Por essas razões, o objetivo deste trabalho foi determinar a transpiração do tomateiro de hábito de crescimento determinado no interior de uma estufa plástica, e o efeito da radiação solar e do déficit de saturação do ar, no cultivo de outono-inverno na região de Santa Maria, RS.

## Material e métodos

O experimento foi realizado no interior de uma estufa plástica localizada no Campo Experimental do Departamento de Fitotecnia do Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM (29°42'S, 53°42'W e 95m de altitude), no Estado do Rio Grande do Sul.

A estufa possuía dimensões de 10m x 24m, com 3m de altura na cumeeira e 2m de pé-direito, estrutura de madeira e coberta com filme de polietileno de baixa densidade (PEBD) transparente de 100µm de espessura.

A ventilação foi realizada através da abertura das cortinas laterais da estufa, totalizando uma área de 24m<sup>2</sup>, e localizadas na parte mais alta do pé-direito ao longo de toda estufa, bem como das portas frontais de 3m de largura por 2m de altura. A abertura das cortinas foi realizada entre 8 e 9 horas da manhã. Na presença de nevoeiro a abertura foi retardada para após sua dissipação e nos dias que ocorreram ventos fortes, temperaturas baixas ou com céu encoberto e moderadamente frio, a estufa foi mantida fechada. O seu fechamento, no início do experimento, época de maior disponibilidade de radiação solar (fevereiro-

abril), foi efetuado em torno das 18 horas. Com a redução do período diário com radiação solar e a conseqüente diminuição das temperaturas (maio-julho), passou-se a realizá-lo mais cedo, em torno das 16 horas, para possibilitar um maior armazenamento de energia no interior da estufa.

Utilizou-se o tomateiro híbrido Emperror, tipo salada, de hábito de crescimento determinado. As plantas foram transplantadas em 10 fileiras dispostas no sentido do comprimento da estufa, numa densidade de três plantas por metro quadrado. Aquelas utilizadas no experimento foram conduzidas em 8 litros de substrato comercial (Plantmax), com capacidade de retenção d'água de 2,5 litros, em sacolas plásticas perfuradas na sua parte inferior, envoltas por um filme plástico de cor preta para evitar a evaporação e proliferação de algas no substrato (VALANDRO et al., 1999).

Foram utilizados três lisímetros de drenagem, instalados nas três fileiras centrais do lado oeste da estufa, e em cada um deles foram cultivadas cinco plantas. Os lisímetros foram construídos conforme descrito por VALANDRO et al. (1999), constando de uma calha de PVC instalada sobre a superfície do solo, com leve inclinação para facilitar o escoamento da água, na cavidade das quais foram colocadas as embalagens crivadas contendo o substrato e nelas cultivadas as plantas. Os erros médios do sistema, obtidos pela diferença entre o volume drenado e fornecido aos lisímetros em duas séries de medidas realizadas em 13 e 10 dias consecutivos, foram, respectivamente, de -0,15% e -1,42% (VALANDRO et al., 1999).

Além das plantas dos lisímetros, outras 68 foram cultivadas na fileira central do lado oeste da estufa, com o mesmo tipo e quantidade de substrato, e conduzidas de forma idêntica que aquelas, com o objetivo de uma eventual necessidade de substituição de alguma planta nos lisímetros durante o experimento e, ainda, para determinar a equação de estimativa da área foliar (AF). A nutrição das plantas conduzidas em substrato foi realizada por meio de fertirrigação, com periodicidade semanal conforme ANDRIOLO & POERSCHKE (1997).

Nas outras 9 fileiras, as plantas foram cultivadas diretamente no solo para servir de bordadura. O solo foi adubado com base em análise laboratorial por ocasião do seu preparo, o qual constou da passagem de enxada rotativa com microtrator.

A irrigação em todas as fileiras foi feita com mangueiras gotejadoras com orifícios distanciados 0,30m um do outro. As plantas dos lisímetros e as outras 68 cultivadas em substrato foram irrigadas diariamente, sempre no início da manhã, sendo que nos dias de maior demanda hídrica foram realizadas duas irrigações, fornecendo-se água até os primeiros sinais de drenagem. Para as plantas de bordadura, cultivadas no solo, o controle da irrigação baseou-se no aspecto visual do mesmo.

A semeadura foi realizada no dia 1º de Fevereiro, nos dias 23 e 24 do mesmo mês as plântulas foram transplantadas, respectivamente, para o solo da estufa e para os lisímetros e fileira com substrato. As plantas foram conduzidas em haste única suspensa por um fio de ráfia preso em um arame a aproximadamente 2m de altura. Periodicamente, foram realizados desbrotos que, devido à cultivar utilizada ser de hábito de crescimento determinado, cuja haste que emite as inflorescências encerra o seu crescimento (CHAMARRO LAPUERTA, 1995), apenas o primeiro broto abaixo das mesmas não foi retirado, tornando-se a haste principal. Durante todo o período experimental monitorou-se o aspecto sanitário das plantas. Em intervalos de duas semanas, aplicou-se fungicidas, alternando-se os produtos comerciais Daconil e Ditane com Folicur para evitar o desenvolvimento de resistência pelos patógenos. Foram realizadas duas aplicações de Vertimec para combater ácaros.

A temperatura ( $t_{mi}$ , °C) e a umidade relativa ( $UR_{mi}$ , %) médias diárias do ar foram calculadas a partir dos registros do termohigrógrafo instalado a 1,5m do solo em abrigo meteorológico localizado no centro da estufa. Para o cálculo das médias utilizaram-se os valores de 2 em 2 horas. A temperatura máxima ( $t_{maxi}$ , °C) e umidade relativa mínima ( $UR_{mini}$ , %) do ar, também foram obtidas dos gráficos do termohigrógrafo. A temperatura ( $t_{me}$ , °C) e umidade relativa ( $UR_{me}$ , %) médias diárias do ar no exterior da estufa, foram calculadas da mesma forma que aquelas do interior da estufa, a partir das medidas realizadas na estação meteorológica localizada a cerca de 50m ao Sul da estufa.

O déficit de saturação do ar diário no interior da estufa ( $D_i$ , kPa) foi calculado pela diferença entre a pressão de saturação do ar ( $e_s$ ) (TETENS, 1930) e a pressão parcial de vapor ( $e_a$ ), a partir das médias diárias da temperatura e umidade relativa do ar.

Estimou-se a densidade de fluxo de radiação solar global incidente no exterior da estufa ( $Rg_e$ ,  $W m^{-2}$ ) a partir de dados de insolação registrados na estação meteorológica, através da equação de Ångstrom-PreScott, com os coeficientes mensais determinados por ESTEFANEL et al. (1990):

$$Rg_e = K_o \downarrow [b_o + b_1 \left(\frac{n}{N}\right)] \quad (1)$$

em que  $K_o$  é a densidade de fluxo de radiação solar global incidente no topo da atmosfera ( $W m^{-2}$ ),  $b_o$  e  $b_1$  coeficientes mensais ajustados para Santa Maria,  $n$  a insolação (horas  $dia^{-1}$ ) e  $N$  o comprimento do dia (horas  $dia^{-1}$ ).

A transpiração diária por planta ( $TRp$ ,  $kg planta^{-1} dia^{-1}$ ) foi calculada a partir dos dados obtidos dos três lisímetros pela diferença entre o volume d'água fornecido ( $I$ ,  $cm^3$ ) e o drenado ( $D$ ,  $cm^3$ ):

$$TRp = \frac{(I_{L1} - D_{L1})/5 + (I_{L2} - D_{L2})/5 + (I_{L3} - D_{L3})/5}{(3)(1000)} \quad (2)$$

em que  $L1$ ,  $L2$  e  $L3$  são, respectivamente, os lisímetros 1, 2 e 3, numerados no sentido leste-oeste, e 1000  $cm^3 kg^{-1}$  é o fator de conversão aproximado de  $cm^3$  para  $kg$ .

Cada lisímetro foi irrigado separadamente e o fluxo de água foi mantido até 3 minutos depois de observar-se o início da drenagem, e cerca de 30 minutos após o término da irrigação, tempo suficiente para se ter o final da drenagem nas condições do trabalho, mediu-se o volume drenado. O consumo foi contabilizado do início da manhã do dia em questão até o início da manhã do dia seguinte. Quando da realização de duas irrigações diárias, o volume irrigado e drenado da segunda irrigação diária foi somado àquele da manhã do dia seguinte.

Como variável de crescimento das plantas, considerou-se a área foliar. Esta foi determinada por uma equação ajustada a partir de medidas das dimensões das folhas. Para tal, empregou-se o método dos discos, sendo que utilizaram-se 15 plantas das 68 cultivadas em substrato fora dos lisímetros. Os limbos das folhas foram destacados da planta e secados em estufa ventilada a  $75^\circ C$  até peso constante. Antes de colocá-los para secagem, selecionou-se 20 folhas representativas de diferentes alturas na planta e retiraram-se 40 discos de 9,1mm de diâmetro, os quais

foram secados nas mesmas condições, para relacionar o peso seco destes com aquele das folhas, obtendo-se assim por simples regra de três a área foliar das plantas ( $AF$ ,  $m^2$ ), visto aquela dos discos ser conhecida. Por meio de regressão estatística, estabeleceu-se regressões lineares da área foliar total da planta obtida por meio dos discos com a largura ( $L$ ,  $m$ ), o comprimento ( $C$ ,  $m$ ) e o produto entre o comprimento e a largura ( $CxL$ ,  $m^2$ ), totais de cada planta, forçando-se a passagem pela intersecção zero. O melhor resultado foi obtido com o produto entre comprimento e largura das folhas ( $R^2=0,86$ ), com um erro padrão de  $0,1984m^2 planta^{-1}$ :

$$AF = 0,3676.CxL \quad (3)$$

A estimativa de  $AF$  das plantas dos lisímetros foi feita aplicando-se os valores de  $CxL$  médio, calculado a partir das medidas de comprimento e largura realizadas em 2 plantas marcadas de cada lisímetro, na Equação 3, obtendo-se assim um valor aproximado da área foliar das plantas das parcelas úteis. Na análise dos dados, utilizaram-se os valores médios ( $m^2$ ) das 6 plantas medidas. A primeira determinação ocorreu no dia 3 de março e a última no dia 5 de julho, totalizando-se 19 determinações separadas de aproximadamente uma semana.

Para estudar o efeito isolado das variáveis meteorológicas  $Rg_e$  e  $D_i$  sobre a transpiração, determinou-se a transpiração diária por unidade de área foliar ( $TRf$ ,  $kg m^{-2} dia^{-1}$ ), conforme a equação:

$$TRf = \frac{TRp}{AF} \quad (4)$$

Na análise dos dados, foram realizadas correlações entre  $TRf$  média dos três lisímetros e as variáveis meteorológicas em planilhas do programa computacional Excel®, calculando-se os coeficientes de determinação ( $R^2$ ). Foram geradas equações estatísticas em função das variáveis meteorológicas que melhor ajustaram os dados, utilizando-se 50% dos mesmos, cujas estimativas foram comparadas com os valores independentes, por meio do coeficiente de determinação e do coeficiente de WILLMOTT et al. (1985) (d), calculando-se, também, o erro padrão ( $\sigma$ ). Na análise dos dados considerou-se o período compreendido entre 18 de março e 4 de julho, por representar o período reprodutivo da cultura.

## Resultados e discussão

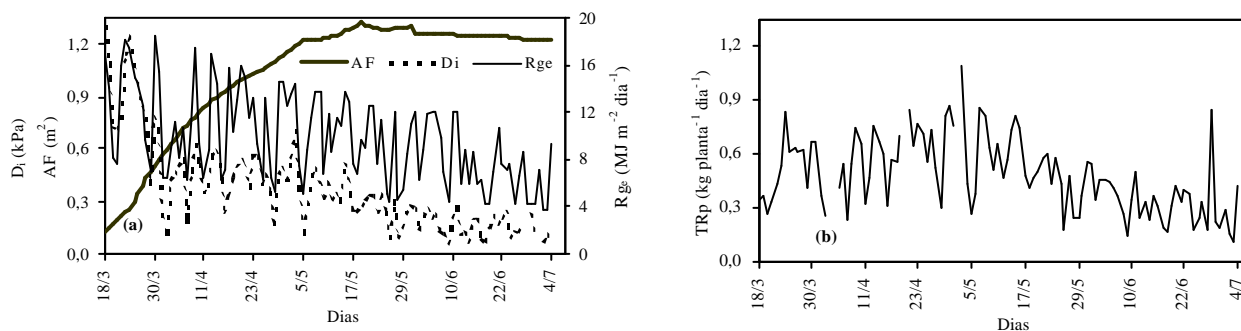
Ao longo do período experimental, em função da redução do comprimento do dia ocorreu uma gradativa diminuição da densidade de fluxo de radiação solar global incidente ( $Rg_e$ ) (Figura 1a). A redução de  $Rg_e$ , por sua vez, ocasionou uma diminuição do déficit de saturação diário do ar no interior da estufa ( $D_i$ ) (Figura 1a), sendo esta ainda intensificada pelo tempo que a estufa permaneceu fechada no decorrer do período experimental, impedindo a dissipação do vapor d'água para o ambiente externo.

As variáveis meteorológicas e de crescimento afetaram fortemente a transpiração do tomateiro. Na Figura 1b observa-se que a transpiração diária por planta ( $TRp$ ) tendeu a aumentar até meados de abril, período em que a demanda atmosférica ainda foi elevada, mas decrescente, e as plantas estavam em pleno crescimento, como mostra a evolução da área foliar das plantas ( $AF$ ) (Figura 1a), o que causou um aumento da superfície transpirante. A diminuição de  $TRp$  do segundo decêndio de maio até o final do experimento ocorreu em função da diminuição da demanda hídrica atmosférica, principalmente, como função da redução de  $Rg_e$ , associada à estabilização do crescimento das plantas, sendo que a partir do terceiro decêndio de maio  $AF$  sofreu uma leve redução causada pela desfolha e senescência das folhas. Esses dados confirmam os resultados obtidos em trabalhos realizados por DALSSASSO (1997), VALANDRO (1999), CARON & HELDWEIN (2000), DLMAGO (2001) e HELDWEIN et al. (2001). A transpiração acumulada ao longo do período experimental, 109 dias (18 de março a 4 de julho), foi de 52,73kg planta<sup>-1</sup>, resultando em uma média de 0,484kg planta<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>.

Apesar de  $Rg_e$  ser determinante da energia disponível para os processos físicos na superfície, sua

relação com a transpiração diária por unidade de área foliar ( $TRf$ ) foi baixa, considerando-se todos os dados. Porém, valores de  $R^2$  mais elevados foram obtidos separando-se os dados em faixas conforme a temperatura média do ar no exterior da estufa ( $t_{me}$ ), sendo que quando  $t_{me} \geq 20^\circ\text{C}$  e  $t_{me} < 15^\circ\text{C}$ , obteve-se bons coeficientes de determinação,  $R^2=0,74$  e  $R^2=0,73$ , com funções de ajuste linear ( $TRf=0,1658.Rg_e-0,2655$ ) e potencial ( $TRf=0,0387.Rg_e^{0,981}$ ), respectivamente, e nos dias com  $15^\circ\text{C} \leq t_{me} < 20^\circ\text{C}$ , houve maior dispersão dos dados ( $R^2=0,66$ ) com uma função linear ( $TRf=0,0600.Rg_e-0,0437$ ) explicando a tendência, sendo que os valores dos coeficientes das equações foram gerados com aqueles de  $Rg_e$  em MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>. Esses resultados são explicados pelas condições meteorológicas predominantes na região na época do experimento, as quais impediram uma boa correlação entre o déficit de saturação do ar no exterior da estufa e a radiação solar incidente e também por alterações no manejo das cortinas laterais da estufa ao longo do período de coleta dos dados.

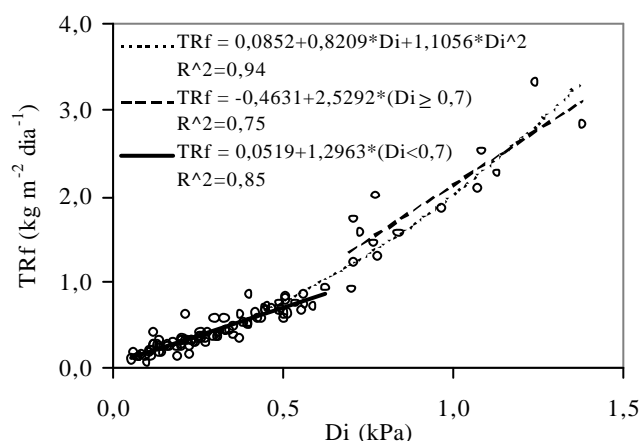
Os coeficientes de determinação entre  $TRf$  e  $Rg_e$  obtidos neste trabalho foram superiores aos obtidos em experimentos realizados anteriormente em Santa Maria, RS, para a mesma época do ano por DALSSASSO et al. (1997) e VALANDRO (1999), mesmo considerando que as unidades de medida não tenham sido as mesmas. DALSSASSO et al. (1997) quantificaram a lâmina de água consumida (mm) pela técnica do balanço hídrico do solo e VALANDRO (1999) considerou a transpiração diária em termos de volume (cm<sup>3</sup>) por planta na relação com  $Rg_e$ , ficando, nesse caso, embutido o efeito da área foliar, o qual ao longo dessa época do ano tem efeito contrário daquele das variáveis meteorológicas. Embora se tenha alcançado melhor ajuste dos dados neste trabalho, os mesmos são ainda inferiores daqueles obtidos nas



**Figura 1.** Densidade de fluxo de radiação solar global incidente no exterior da estufa ( $Rg_e$ ), déficit de saturação do ar no interior da estufa ( $D_i$ ) e área foliar das plantas ( $AF$ ) (a); transpiração diária por planta de tomateiro ( $TRp$ ) (b), período entre 18/03/99 e 04/07/99. Santa Maria, RS.

condições climáticas da Europa (DE VILLELE, 1972; BOULARD et al., 1991) e do Japão (OKUYA & OKUYA, 1988; YANG et al., 1990), onde foram encontradas elevadas correlações da transpiração com a radiação solar. Provavelmente, as condições climáticas dessas regiões fazem com que o manejo da estufa dependa basicamente da incidência de radiação solar, permitindo que esta integre o seu efeito e, também, o das outras variáveis meteorológicas. Na região de Santa Maria, existem outros fenômenos que freqüentemente interferem no manejo da estufa como, por exemplo, nevoeiros, ventos fortes de direções norte e sudeste. DALSSASSO (1997) e VALANDRO (1999) encontraram bons coeficientes de determinação com a radiação solar no cultivo de primavera-verão, quando nevoeiros e entradas de frentes frias ocorrem com menor freqüência e o crescimento das plantas é acompanhado pelo aumento da demanda hídrica atmosférica.

Os valores de  $TR_f$  acompanharam bem as flutuações de  $D_i$ , sendo que ambas as variáveis apresentaram nítida tendência de decréscimo com o avanço do ciclo da cultura. Essa proporcionalidade observada entre  $TR_f$  e  $D_i$  é confirmada pelo elevado ajuste dos dados (Figura 2). Nota-se que existem dois grupos de dados, referentes aos valores de  $D_i \geq 0,7\text{kPa}$ , quando esta variável teve peso maior na transpiração, conforme o valor do coeficiente b da equação linear, comparando-se com aquele para a equação referente aos dados de  $D_i < 0,7\text{kPa}$ , porém, com ajuste inferior



**Figura 2.** Correlação entre a transpiração diária por unidade de área foliar ( $TR_f$ ) e o déficit de saturação do ar diário no interior da estufa ( $D_i$ ) e os respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), considerando-se toda gama de variação de  $D_i$ ;  $D_i \geq 0,7\text{kPa}$  e  $D_i < 0,7\text{kPa}$ , no período entre 18/03/99 e 04/07/99. Santa Maria, RS.

( $R^2=0,75$  para  $D_i \geq 0,7\text{kPa}$ ;  $R^2=0,85$  para  $D_i < 0,7\text{kPa}$ ). Coeficiente de determinação elevado ( $R^2=0,94$ ) foi obtido com uma equação polinomial quadrática considerando-se toda a gama de variação de  $D_i$ .

A elevada correlação obtida entre  $TR_f$  e  $D_i$  pode ser explicada, em parte, pelo manejo das aberturas laterais e portas frontais da estufa, que dependeu, principalmente, das condições meteorológicas externas ocorridas durante o período experimental. Em dias consecutivamente frios e pouco ensolarados a estufa não foi aberta para ventilação, acumulando vapor d'água no seu interior, resultando em valores  $D_i$  baixos. Essa condição de umidade do ar limitou a transpiração das plantas, embora as condições de temperatura do ar no interior da estufa e de disponibilidade de radiação solar fossem favoráveis a um fluxo transpiratório relativamente elevado. Outro motivo para o elevado ajuste entre  $TR_f$  e  $D_i$ , foi a freqüente entrada de frentes frias, originando temperaturas baixas, nebulosidade e precipitação, exigindo o fechamento da estufa. Mesmo que no exterior da mesma, nestas condições, ocorresse baixa disponibilidade de radiação solar global, a elevação da temperatura do ar no interior da estufa proporcionou um aumento da demanda evaporativa do ar (DALSSASSO, 1997; BURIOL et al., 2001).

VALANDRO (1999) já havia observado que, para as condições climáticas de Santa Maria, a estimativa da transpiração pelas plantas no período de outono-inverno é mais eficiente quando se considera a umidade relativa do ar. Resultados semelhantes foram obtidos por OKUYA & OKUYA (1988), que encontraram uma boa correlação da transpiração das plantas com o déficit de saturação do ar diurno ( $R^2=0,87$ ), na condição do clima úmido do Japão. Estes resultados indicam que as variáveis que quantificam a demanda hídrica atmosférica têm forte potencial para a estimativa da transpiração do tomateiro cultivado em estufas plásticas nas condições de clima úmido.

Considerando os elevados valores de  $R^2$  obtidos entre  $TR_f$  e  $D_i$ , separou-se 50% dos dados alternadamente para ajustar as equações de estimativa de  $TR_f$  e comparar os valores estimados com aqueles medidos e não utilizados na determinação das equações. Foram geradas equações lineares para os valores referentes a  $D_i \geq 0,7\text{kPa}$  e  $D_i < 0,7\text{kPa}$ , sendo que para o primeiro, todos os dados foram utilizados para a determinação da equação devido ao baixo número de registros. Determinou-se, também, uma equação quadrática considerando-se toda gama de variação de  $D_i$ .

Na Tabela 1 estão apresentados os coeficientes a, b e c das equações de estimativa, juntamente com o erro padrão ( $\sigma$ ) dos coeficientes e do modelo, bem como a transpiração média diária por unidade de área foliar utilizados no ajuste dos modelos ( $TRfm$ ), o número de observações (n) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Observa-se que os valores de  $R^2$  das Equações (5) e (7) foram praticamente os mesmos daqueles obtidos com todos os dados (Figura 2). Os valores do erro padrão dos coeficientes e do modelo foram elevados comparados aos valores de  $TRfm$ . Para a equação considerando  $D_i \geq 0,7\text{kPa}$  (Equação 6), o ajuste dos dados foi inferior e o erro padrão do modelo e dos coeficientes foi superior, comparando-se às Equações (5) e (7).

As Equações (5) e (7) tenderam a subestimar os valores medidos independentes, em maior grau quando originaram-se da Equação (7), como pode ser notado pelos valores dos coeficientes b das equações de regressão na Figura 3. Valor levemente superior do coeficiente de Willmott foi observado quando do uso da Equação (5). No entanto, o ajuste dos dados estimados por esta Equação com os medidos foi consideravelmente superior àquele obtido com as estimativas da Equação (7), respectivamente,  $R^2=0,95$  e  $R^2=0,83$ . Porém, o erro padrão foi maior quando utilizada a Equação (5) ( $\sigma=0,122\text{kg m}^2 \text{ dia}^{-1}$ ) em relação à Equação (7) ( $\sigma=0,080\text{kg m}^2 \text{ dia}^{-1}$ ), mas em ambos os casos foram relativamente elevados comparados ao valor médio dos valores medidos ( $0,595\text{kg m}^2 \text{ dia}^{-1}$  para a Equação (5) e  $0,416 \text{kg m}^2 \text{ dia}^{-1}$  para a Equação (7) referentes a  $D_i < 0,7\text{kPa}$ ), principalmente, considerando-se o valor mínimo medido ( $TRf = 0,084\text{kg m}^2 \text{ dia}^{-1}$ ), o qual é inferior ao erro médio encontrado com a Equação (5). Isso significa que nos dias de baixo déficit hídrico é possível que o

erro da estimativa seja maior do que a quantidade de água requerida, porém, como nesses dias a transpiração das plantas é baixa, o erro em termos absolutos não chega a ser comprometedor.

Multiplicando-se os valores de  $TRf$  pela área foliar da planta, obtém-se os valores de  $TRp$ , cuja correlação com os valores medidos é apresentada na Figura 4. Observa-se que o ajuste dos dados diminuiu em relação à  $TRf$ . Os valores de "d" também foram inferiores. Neste caso, os valores de  $\sigma$  representam praticamente a mesma proporção em relação aos valores médios medidos [ $TRpm = 0,455\text{kg planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  para a Equação (5) e  $TRpm = 0,446\text{kg planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  para a Equação (7)] observada quando considerado  $TRf$ , porém, foram inferiores ao valor mínimo observado ( $TRp = 0,104\text{kg planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ). Os valores estimados pela Equação (5) tenderam a superestimar levemente os valores medidos ( $b = 1,0243$ ) com um coeficiente linear muito baixo ( $a = 0,0055\text{kg planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) (Figura 5a), enquanto que a Equação (7) tendeu a subestimar significativamente os valores medidos ( $b = 0,8853$ ) com um coeficiente linear mais elevado ( $a = 0,0642\text{kg planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ).

A redução do ajuste dos dados observado quando utilizado  $TRp$  em relação a  $TRf$  pode ser explicado pelo efeito da área foliar no déficit de saturação folha-ar e temperatura da folha do dossel, além da radiação solar recebida por unidade de área foliar, visto que, com o desenvolvimento da planta, estas grandezas são modificadas com o maior sombreamento e a menor ventilação das folhas inferiores das plantas, resultando num microclima diferenciado no interior do dossel (BOULARD et al., 1991; YANG et al., 1990), o qual não é considerado quando utilizado o déficit de saturação do ar que é determinado sobre a cobertura vegetal.

**Tabela 1.** Coeficientes das equações de regressão entre  $TRf$  e  $D_i$  (a, b e c) com os respectivos erros padrão (S), número de observações utilizadas para gerar os modelos (n) e o valor médio dos valores de  $TRf$  utilizados na determinação dos modelos ( $TRfm$ ).  $TRf$  máximo foi  $3,323 \text{kg m}^2 \text{ dia}^{-1}$  e o mínimo  $0,084 \text{kg m}^2 \text{ dia}^{-1}$ . As Equações foram geradas para  $0,06\text{kPa} \leq D_i \leq 1,38\text{kPa}$ .

Equação	a ( $\text{kg m}^2 \text{ dia}^{-1}$ )	b ( $\text{kg m}^2 \text{ dia}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ )	c ( $\text{kg m}^2 \text{ dia}^{-1} \text{ kPa}^{-2}$ )	Sa ( $\text{kg m}^2 \text{ dia}^{-1}$ )	Sb ( $\text{kg m}^2 \text{ dia}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ )	Sc ( $\text{kg m}^2 \text{ dia}^{-1} \text{ kPa}^{-2}$ )	S modelo ( $\text{kg m}^2 \text{ dia}^{-1}$ )	$TRfm$	n	$R^2$
5	0,0834*	0,8371	1,0881	0,06	0,25	0,20	0,17	0,655	53	0,93
6	-0,4631*	2,5292		0,40	0,43		0,35	1,912	14	0,75
7	0,0570	1,2832		0,03	0,08		0,08	0,432	45	0,87

\*Não significativo à 5% de probabilidade

$$5 - TRf = a + b.D_i + c.D_i^2$$

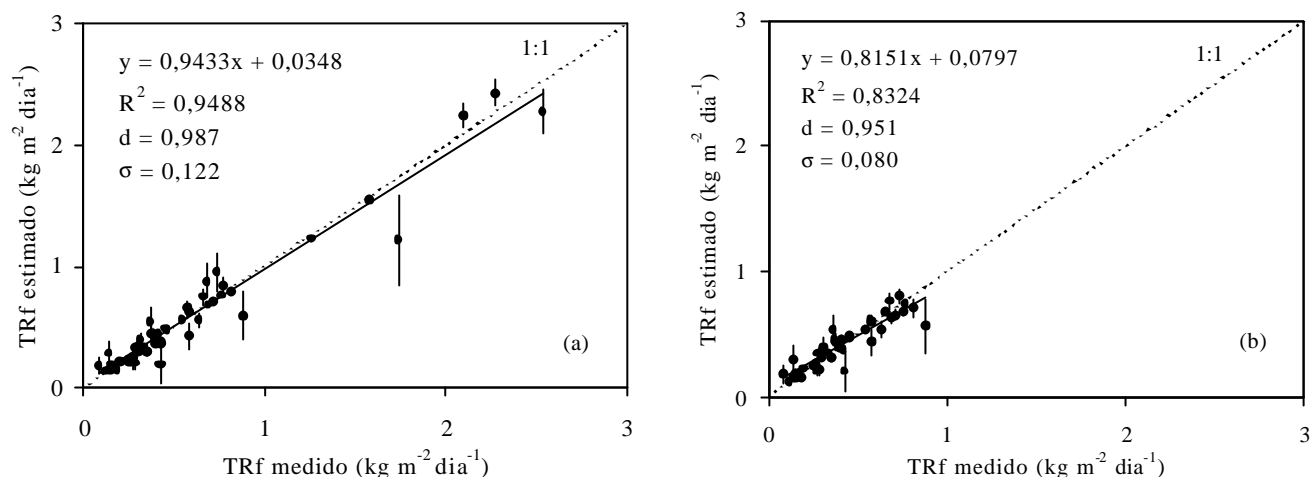
$$6 - TRf = a + b.(D_i \geq 0,7)$$

$$7 - TRf = a + b.(D_i < 0,7)$$

$$TRp = AF.(a + b.D_i + c.D_i^2)$$

$$TRp = AF.[a + b.(D_i \geq 0,7)]$$

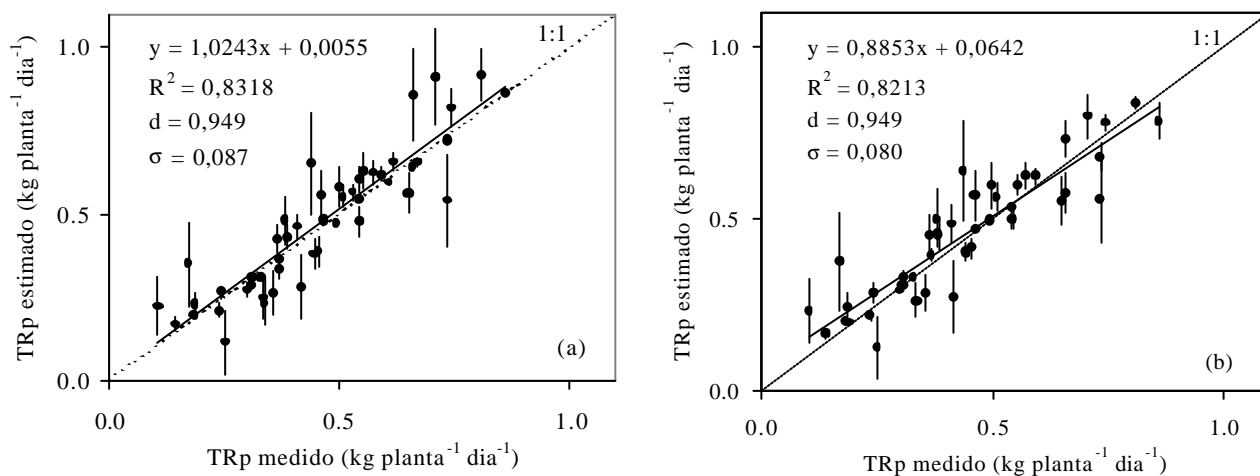
$$TRp = AF.[a + b.(D_i < 0,7)]$$



**Figura 3.** Correlação entre os valores da transpiração diária por unidade de área foliar ( $TRf$ ) medidos e estimados pela Equação (5) (a) e pela Equação (7), considerando-se somente os dados de  $D_i < 0,7 \text{ kPa}$  (b), juntamente com seus respectivos desvios padrão ( $\sigma$ ), coeficiente de determinação ( $R^2$ ), coeficiente de Willmott ( $d$ ) e o erro padrão ( $\sigma$ ), no período entre 18/03/99 e 04/07/99. Santa Maria, RS

A Equação (5), que possibilita a estimativa de  $TRf$  para toda a gama de variação de  $D$ , pelo maior ajuste dos dados e a maior proximidade da linha 1:1, pode ser considerada mais eficiente na determinação da transpiração pelas plantas de tomateiro cultivado no interior de estufas plásticas, embora tenha apresentado valores de  $\sigma$  mais elevados, porém, o número de dados foi superior. Como estas equações foram determinadas com valores diários, é esperada uma boa estimativa quando utilizados os dados do dia em questão para estimar o consumo d'água do mesmo,

permitindo repor para o dia seguinte a água perdida para a atmosfera. Se o cultivo for em solo, que tem uma boa capacidade de armazenamento de água, é possível de se obter um bom resultado, sem desperdício ou escassez de água. Para cultivo em substrato, no qual é necessário um número maior de irrigações diárias, o **modelo deve ser testado com valores médios diários** referentes a determinados intervalos do dia (1 hora ou mais). JOLLIET & BAILEY (1992), obtiveram praticamente os mesmos coeficientes considerando todo o período diário e os dados horários.



**Figura 4.** Correlação entre os valores medidos da transpiração diária por planta ( $TRp$ ) e os estimados pela Equação (5) (a) e pela Equação (7), considerando-se somente os dados de  $D_i < 0,7 \text{ kPa}$  (b), juntamente com seus respectivos desvio padrão ( $\sigma$ ), coeficiente de determinação ( $R^2$ ), coeficiente de Willmott ( $d$ ) e erro padrão ( $\sigma$ ), no período entre 18/03/99 e 04/07/99. Santa Maria, RS.



## Conclusões

No período de outono-inverno o déficit de saturação de vapor d'água no interior da estufa é a variável meteorológica com melhor correlação, indicando boa potencialidade de uso na determinação da transpiração pelo tomateiro nessas condições. Das equações obtidas neste trabalho, a Equação (5) ( $TRf=0,0834+0,8371.D+1,0881.D^2$ ) é a mais recomendada para estimativas da transpiração.

Sugere-se novas pesquisas comparando-se cultivares de ambos hábitos de crescimento, conduzidas em solo e substrato para verificar esses resultados.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento de Fitotecnia, do Centro de Ciências Rurais, da Universidade Federal de Santa Maria pelo oferecimento de toda a infra-estrutura necessária para a realização desse trabalho, e também aos colegas e aos funcionários do Departamento que muito colaboraram no experimento de campo. Um agradecimento especial ao Prof. Dr. Jerônimo L. Andriolo que participou com idéias importantes no desenvolvimento desse trabalho.

## Referencias bibliográficas

ANDRIOLO, J. L.; POERSCHKE, P.R.C. **Cultivo do tomateiro em substratos**. Santa Maria: UFSM – Centro de Ciências Rurais, 1997. 12 p. (Informe Técnico, 2).

BAILLE, M.; BAILLE, A.; LAURY, J.C.. A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs. climate factors and leaf area. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 59, p. 217-232, 1994.

BOULARD, T. et al. Mesures et modélisation de la résistance stomatique foliaire et de la transpiration d'un couvert de tomates de serre. **Agronomie**, Paris, v. 11, p. 259-274, 1991.

BURIOL, G. A. et al. Modificação na temperatura mínima do ar causadas por estufas de polietileno transparente, de baixa densidade. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 43-49, 1993.

BURIOL, G.A. et al. Efeito da ventilação sobre a temperatura e umidade relativa do ar em túneis baixos de polietileno transparente e o crescimento da alface. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 17-24, 1997.

BURIOL, G.A. et al. Modificação da umidade relativa do ar pelo uso em estufa plástica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 11-18, 2000.

BURIOL, G.A. et al. Evaporação d'água em estufas plásticas e sua relação com o ambiente externo: 1 – avaliação do uso do tanque classe A e do evaporímetro de Piche. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 35-41, 2001.

CARON, B.O.; HELDWEIN, A.B. Consumo d'água e coeficiente de cultura para meloeiro cultivado em estufa plástica na primavera. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 19-25, 2000.

CHAMARRO LAPUERTA, J. Anatomia y fisiología de la planta. In: NUEZ, V.F. **El Cultivo del Tomate**. Madrid: Mundi-Prensa, 1995. p. 43-91.

DALMAGO, G.A. Evapotranspiração máxima e sua modelagem para a cultura do pimentão em estufa plástica. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2001. 166 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia), UFSM, 2001.

DALSASSO, L.C. **Consumo de água e coeficiente de cultura do tomateiro (*Lycopersicon esculentum*, M.) e do pepino (*Cucumis sativus*, L.) cultivados em estufas plásticas**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1997. 84 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – UFSM, 1997.

DALSASSO, L. C. et al. Consumo de água e coeficiente de cultura do tomateiro tipo salada cultivado em estufa plástica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 61-67, 1997.

DE VILLELE, O. Besoins en eau des cultures sous serre: essai de conduite des arrosages en fonction de l'ensoleillement. **Acta Horticulturae**, Den Haag, v. 35, p. 123-129, 1972.

ESTEFANEL, V. et al. Insolação e radiação solar de Santa Maria, RS: I – Estimativa da radiação solar global incidente a partir dos dados de insolação. **Revista Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, v. 20, n. 3-4, p. 203-218, 1990.

HELDWEIN, A.B. et al. Gradiente vertical de temperatura do ar no interior de estufas plásticas. In: REUNIÓN ARGENTINA, 7. Y LATINO AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 1., 1997, Buenos Aires. **Actas...**, Buenos Aires, UBA, 1997, p. 11-12.

HELDWEIN, A.B. et al. Evaporação d'água em estufas plásticas e sua relação com o ambiente externo: 2 – Efeito da espécie cultivada e da época do ano nos valores obtidos com minitanques. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, p. 35-41, 2001.

- JOLLIET, O.; BAILEY, B.J. The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 58, p. 43-62, 1992.
- OKUYA, A.; OKUYA, T. The transpiration of greenhouse tomato plants in rockwool culture and its relationship to climatic factors. **Acta Horticulturae**, Den Haag, v. 230, p. 307-311, 1988.
- SCHNEIDER, F.M. et al. Modificação da temperatura do solo causadas por estufas de polietileno transparente de baixa densidade em Santa Maria, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 37-42, 1993.
- SCHNEIDER, F.M. et al. Tecnologia para diminuir temperaturas excessivamente elevadas no interior de estufas plásticas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 2, p. 285-287, 1998.
- STANGHELLINI, C. **Transpiration of greenhouse crops, an aid to climate management**. Wageningen: Agricultural University, 1987. 150 p. Dissertação (Ph.D.) - Agricultural University, 1987.
- TETENS, O. Uber einige meteorologische Begriffe. **Zeitschrift der Geophysick**, v. 6, p. 297-309, 1930.
- VALANDRO, J. **Transpiração do tomateiro cultivado fora do solo em estufa plástica e sua relação com os elementos meteorológicos e parâmetros de crescimento**. Santa Maria:UFSM, 1999. 67 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria.
- VALANDRO, J.; ANDRIOLO, J.L.; BURIOL, G.A. Dispositivo lisimétrico simples para determinar a transpiração das hortaliças cultivadas fora do solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 2, p. 189-193, 1999.
- WILLMOTT, C.J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, n. C5, p. 8995-9005. 1985.
- YANG, X. et al. Transpiration, leaf temperature and stomatal resistance of a greenhouse cucumber crop. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 51, p. 197-209, 1990.

