



## Utilização da equação de Hargreaves Samani para o cálculo da ETo em estufas

S. Shahidian<sup>1</sup>, R.P. Serralheiro<sup>1</sup>, J.L.Teixeira<sup>2</sup>, J. Serrano<sup>1</sup>, F.L. Santos<sup>1</sup>, R.C. Guimarães<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ICAAM, Dep. Eng. Rural, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora. Portugal. E-mail: shakib@uevora.pt

<sup>2</sup> Departamento de Eng. Rural. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal. E-mail: jlteixeira@isa.utl.pt

### Resumo

A equação de Hargreaves Samani, HS, tem sido utilizada com sucesso para o cálculo da Evapotranspiração, Eto, ao ar livre. Os resultados indicam uma boa correlação entre a Eto obtida por este método e a obtida pelo método de Penman-Monteith, PM, que exige um conjunto maior de parâmetros. Até a data pouco se sabe sobre a aplicabilidade da equação de HS em agricultura protegida. Neste ensaio foram instalados mini-lisímetros numa estufa na Herdade de Mitra, Évora. A cultura utilizada foi a relva, por forma a eliminar a necessidade de determinação exacta do coeficiente cultural. Foram medidos em intervalos de 15 minutos a Temperatura do ar, radiação, Humidade Relativa e o vento no interior e exterior da estufa. A equação de HS foi calibrada com base nos valores dos lisímetros e com base na equação de PM. Os resultados indicam que no interior da estufa há uma diminuição da radiação em 44%, e o aumento da temperatura máxima em 2,4°C e da temperatura mínima em 3,7°C. A utilização da estufa permitiu uma poupança de água de 42%. A equação de HS resulta em boas estimativas de Eto, desde que seja devidamente calibrada para a radiação no interior da estufa. A inclusão da radiação no cálculo da Eto pela equação de HS não melhora os resultados.

### Abstract

The Hargreaves Samani equation, HS, has been used successfully for calculating Evapotranspiration, Eto, in open air. The results indicate a good correlation between Eto obtained with this method and that obtained through the Penman- Monteith, PM, method, which requires a larger number of parameters. Until now, little is known about the use of the HS equation in greenhouses. In this work, mini-lysimeters were installed in a greenhouse at the Mitra Experimental Farm, in Évora. Lawn was used as the crop, in order to eliminate the need for the exact determination of the crop coefficient. Air temperature, radiation, relative humidity and wind were measured at 15 minute intervals inside and outside of the greenhouse. The HS equation was calibrated based on the values from the lysimeters and the PM equation. The results indicate that inside the greenhouse the radiation decreases by 44%, maximum temperature increases by 2.4°C and the minimum temperature by 3.7°C. The use of greenhouse resulted in a water saving of 42%. The HS equation results in good estimates of Eto once it has been calibrated for the radiation intensity inside the greenhouse. The inclusion of the radiation in the calculation of Eto by the HS equation did not improve the results.

**Palavras Chaves:** *Evapotranspiração, Hargreaves, rega em estufas.*

## 1. INTRODUÇÃO

A escassez de água enquanto um recurso natural exige uma gestão aprimorada da rega por forma a maximizar a sua produtividade. O cálculo da evapotranspiração permite ajustar as dotações da rega às necessidades hídricas das culturas. A FAO (Allen et al., 1998) propôs uma metodologia para o cálculo da Evapotranspiração baseada na equação de Penman Monteith. Essa metodologia é hoje universalmente aceite como referência na estimativa da Evapotranspiração potencial.

No entanto, a equação de Penman-Monteith exige quatro parâmetros (temperatura, humidade relativa, radiação e velocidade do vento) para produzir resultados rigorosos, o que nem sempre é economicamente viável. Por outro lado, os instrumentos utilizados necessitam de manutenção e calibração regular, como é o caso dos piranómetros e higrómetros. É frequente os piranómetros terem um desvio de 10 por cento (Sammis, 1998). Henggeleer et al (1996) verificou por sua vez que os higrómetros perdem cerca de 1% de precisão por cada mês de funcionamento.

Por isso, têm sido desenvolvidas diversas equações para o cálculo da evapotranspiração utilizando um conjunto mínimo de parâmetros, tais como a equação de Hargreaves-Samani, HS, de Jensen-Haise, a FAO Blaney-Criddle, a FAO Radiação e o método de Priestley-Taylor (Hargreaves e Samani, 1982, 1985; Jensen e Haise, 1963; Blaney e Criddle, 1950; Priestly e Taylor, 1972).

Estas metodologias permitem calcular de forma expedita e sem grande investimento na aquisição e manutenção de estações meteorológicas o consumo de água pelas plantas e o ajuste da dotação aplicada às necessidades reais das plantas. O controlo “inteligente” ou “adaptativo” da rega permite não só a poupança de água, como também de energia na bombagem, de nutrientes, e um respeito pelo ambiente ao reduzir os efluentes potencialmente poluentes da produção agrícola.

Hargreaves analisou oito anos de dados de evapotranspiração de relva com um lisímetro de precisão e dados de Davis, Califórnia e observou através de regressões que para um passo de cálculo de cinco dias, 94% da variabilidade na Evapotranspiração,  $E_{to}$ , medido podia ser explicado através da temperatura média  $T$ , e da radiação solar  $R_s$ . Assim, em 1975 publicou uma equação para a previsão da  $E_{to}$  baseada em apenas estes dois parâmetros:

$$E_{T_o} = 0.0135 R_s (T + 17.8) \quad (1)$$

onde  $R_s$  está em unidades de evaporação de água,  $\text{mm dia}^{-1}$ , e  $T$  em  $^{\circ}\text{C}$ .

A fracção da radiação extraterrestre que efectivamente atravessa as nuvens e chega à superfície da terra é a fonte principal de energia para evapotranspiração, e estudos posteriores por parte de Hargreaves e Samani (1982) demonstraram que o seu valor pode ser estimado a partir da diferença entre as temperaturas máximas,  $T_{max}$  e mínimas,  $T_{min}$  diárias. Em condições de céu descoberto a atmosfera é transparente à radiação solar

incidente, pelo que  $T_{max}$  será elevada, enquanto que as temperaturas nocturnas serão baixas devido à radiação de comprimento de onda longa emitidas (Allen et al. 1998). Por outro lado, em condições de céu coberto,  $T_{max}$  será mais baixo porque uma parte da radiação solar incidente nunca atinge o solo, enquanto que as temperaturas nocturnas serão relativamente mais elevadas pelo facto das nuvens limitarem as perdas de energia através da radiação de comprimento de onda longa. Com base neste princípio, Hargreaves e Samani (1982) recomendaram uma equação simples para estimar a radiação solar utilizando a raiz quadrada da diferença entre as temperaturas,  $\Delta T$ :

$$\frac{R_s}{R_a} = K_T (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (2)$$

onde  $R_a$  é a radiação extraterrestre em  $\text{mm dia}^{-1}$ , e pode ser obtida através de tabelas (Samani, 2000) ou calculada (Allen et al. 1998). Ao Coeficiente empírico,  $K_T$  foi inicialmente atribuído o valor de 0.17 para Salt Lake City e outras regiões semi-áridas, e mais tarde Hargreaves (1994) recomendou a utilização do valor 0.162 para regiões interiores onde predominam massas terrestres, e 0.190 para regiões costeiras, onde as massas de ar são influenciadas pelas massas de água. De uma forma geral, pode assumir-se que esta equação contabiliza o efeito da nebulosidade e da humidade sobre a radiação solar recebida, embora de forma indirecta. A fracção de radiação solar incidente ( $R_s/R_a$ ) assume valores de 0.75 num dia de céu limpo a 0.25 num dia com céu encoberto.

Baseado nas Equações (1) e (2) Hargreaves e Samani (1985) desenvolveram uma equação simples que necessita apenas da temperatura do ar, e coeficientes dependentes da latitude do local e época do ano. Esta equação, conhecida como a equação de Hargreaves-Samani pode ser expressa da seguinte forma:

$$ET_o = 0.0135 K_T (T + 17.78)(T_{mzx} - T_{min})^{0.5} R_a \quad (3)$$

Como normalmente  $K_T$  assume o valor de 0.17, muitas vezes substitui-se a parcela  $0.0135K_T$  por 0.0023. Adicionalmente, a equação pode ser utilizada com  $R_a$  em  $\text{MJm}^{-2} \text{dia}^{-1}$ , bastando para isso multiplicar a parcela direita da equação por 0.408.

Esta equação (designada em diante por HS) tem produzido resultados satisfatórios ao ar livre em diversas partes de mundo, apesar da sua aparente simplicidade. Sepahskhah e Razzaghi (2009) utilizaram lisímetros para comparar as equações de Thornthwaite, Willmott e HS nas regiões semi-áridas do Irão e concluíram que a equação de HS calibrada era a mais precisa. Lopes Urrea et al. (2006), compararam sete equações de  $ET_o$  na região árida de sul de Espanha com dados de lisímetros e concluíram que a HS era a segunda melhor a seguir à PM.

Estudos anteriores têm demonstrado que o vento é uma fonte importante da variabilidade no valor da  $ET_o$  (Martínez-Cob and Tejero-Juste, 2004, Jensen et al., 1997), e como a equação de Hargreaves não contabiliza o vento, diverge sensivelmente de cálculos realizados com a equação de Penman-Monteith. Como na estufa a velocidade do vento é

negligenciável, é provável que estas equações possam produzir resultados mais satisfatórias no interior de estufas do que no exterior.

Num dos poucos trabalhos publicados sobre a aplicabilidade da equação de HS em ambiente protegido, Fernandez et al. (2010) verificaram que 61% da radiação solar era transmitida para o interior da estufa, e que as temperaturas interiores eram em média 1°C acima da temperatura exterior. Adicionalmente verificaram que a evapotranspiração no interior da estufa era entre 1 mm (Janeiro) e 4 mm (Julho) inferior ao exterior. Markus e Assouline (2007) verificaram que na estufa a radiação solar era 40% inferior ao ar livre e as necessidades hídricas de uma cultura de pimentão diminuía em 38%

Fernandez et al. (2010) verificaram que a equação de Hargreaves sobreestimava a evapotranspiração no interior da estufa, no entanto produzia resultados aceitáveis quando se utilizava um factor de correcção devido à transmitância da estufa. Estes autores verificaram também que o método PM subestimava a evapotranspiração em 17%.

Apesar do grande número de trabalhos sobre a utilização da equação de HS ao ar livre, pouco se sabe sobre a sua aplicabilidade em estufas. O objectivo deste trabalho é realizar uma avaliação global do comportamento da equação de HS em estufas, dada a grande simplicidade desta equação e a oportunidade que proporciona para o cálculo da ETo utilizando apenas um sensor de temperatura.

## **2. MATERIAL E METODOLOGIAS**

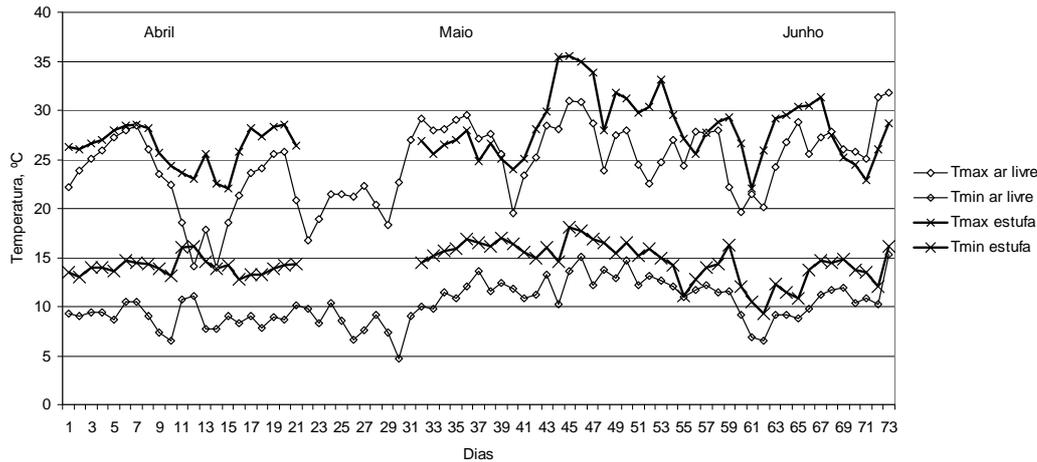
O ensaio foi realizado entre Março e Junho de 2011 na estufa número 3 do Centro Experimental de Mitra, localizado a sul de Évora, Portugal. A estufa tem uma cobertura em policarbonato alveolar, e está orientada no sentido SE- NO. Por forma a evitar os erros associados com a estimativa do  $K_c$ , este estudo utiliza o relvado como cultura, assim evitando a necessidade de estimar valores diferentes de  $K_c$  para os estádios de desenvolvimento da cultura.

Foram instalados oito mini-lisímetros plásticos com o diâmetro de 35cm e uma profundidade de 25 cm. Foi plantado relvado a partir de propagulos de *paspalum spp.* Os mini-lisímetros têm uma precisão de 0.5g, o que dada a área do relvado, representa uma evapotranspiração de 0.02 mm.

Foram medidos continuamente a intervalos de 15 min. a temperatura, humidade relativa, radiação solar e velocidade do vento no interior e exterior da estufa utilizando dois conjuntos de dataloggers. As temperaturas do ar foram continuamente monitorizadas utilizando um termister de precisão PT100. A humidade relativa foi monitorizada utilizando higrómetros HIH-4000 individualmente calibrados. A radiação solar incidente e a transmitida pela cultura foram medidas com piranómetros SI110 da Skye. Os lisímetros foram regados todos os dias pelas 17:30, com base na evapotranspiração medida no dia anterior. Por forma a garantir a precisão das dotações aplicadas, os volumes aplicados foram medidos num balão volumétrico. O relvado foi cortado semanalmente a cerca de 2cm de altura.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta a variação da  $T_{max}$  e  $T_{min}$  ao ar livre e no interior da estufa. Verifica-se que tanto a  $T_{max}$  como a  $T_{min}$  são superiores no interior da estufa. Efectivamente a  $T_{max}$  média para o período aumenta de 25.2 para 27.6, enquanto que a  $T_{min}$  média aumenta de 10.7 para 14.4. Assim, o valor médio de  $\Delta T$  passa de 14.6 para 13.2, ou seja há um redução do componente  $\Delta T$  da Equação 3.



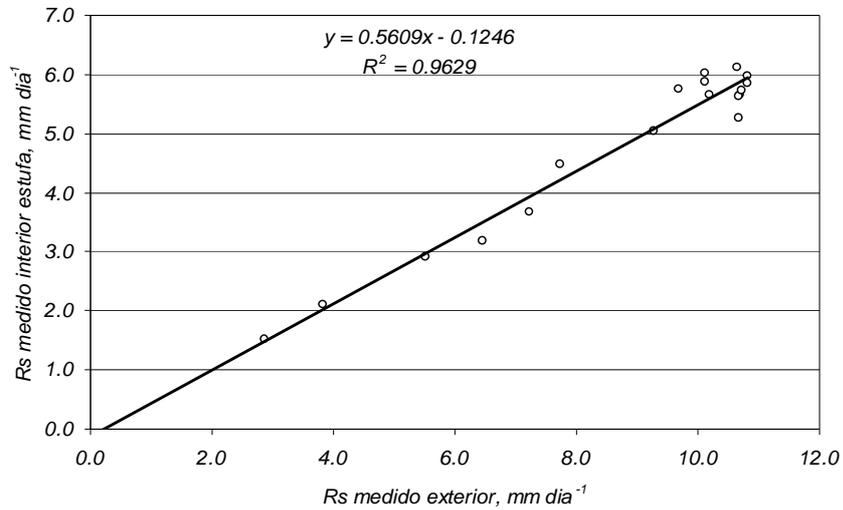
**Figura 1.** Evolução diária da Tmin, T e Tmax no interior da estufa e ao ar livre, ao longo do período de ensaio.

A intensidade da radiação solar incidente é afectada pela cobertura da estufa, esperando-se que haja uma redução de acordo com o tipo de revestimento. Para a estufa da Mitra, foram medidas a radiação solar incidente no interior e exterior da estufa, e a sua correlação está apresentada na Figura 2. Verifica-se que a radiação no interior de estufa corresponde a apenas 56% da radiação exterior. Com base nesta equação é possível calibrar a equação (3) para as condições do ensaio de forma a calcular a evapotranspiração reduzida no interior da estufa. Assim, e para a estufa em análise, a equação 3 transforma-se em:

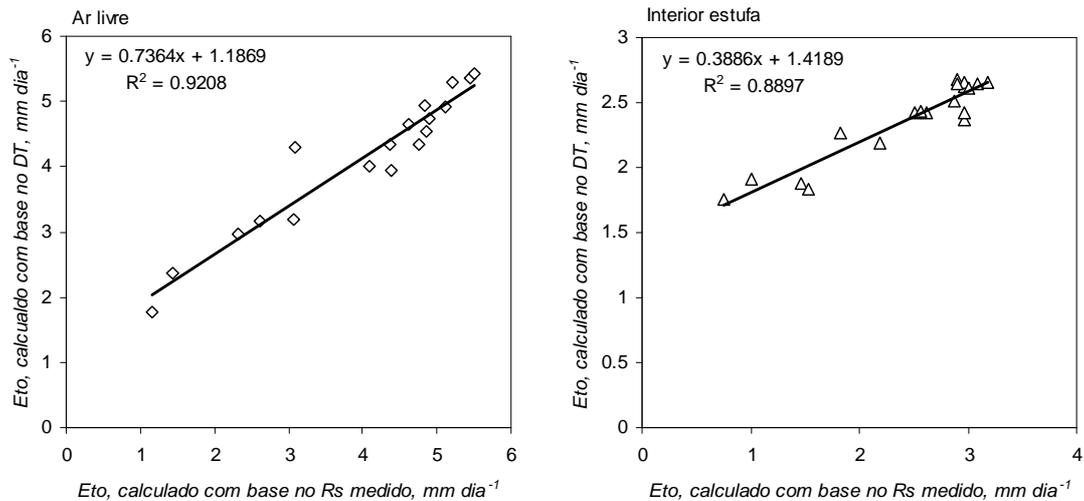
$$ET_o = 0.0135 K_T (T + 17.78)(T_{mzx} - T_{min})^{0.5} (0.5609R_a - 0.1246) \quad (4)$$

Com os coeficientes de calibração determinados através da Eq. 4, é possível calcular a  $E_{to}$  HS utilizando os valores de  $R_s$  medidos e utilizando os valores da  $\Delta T$  (Figura 3). Verifica-se que ao ar livre há uma excelente correlação entre a evapotranspiração calculado com base na  $R_s$  medido e com base no  $\Delta T$ . Efectivamente o declive da recta de regressão é 0.73, e o  $R^2$  é 0.92. No interior da estufa verifica-se que a correlação é ligeiramente menor, com um  $R^2$  de 0.89, e que o declive da recta de regressão é apenas 0.38. Adicionalmente as ordenadas na origem tem o valor de 1.42. O valor elevado da ordenada na origem indica a existência de evapotranspiração com origem na temperatura, mesmo quando a radiação solar é baixa ou inexistente. Isto pode dever-se ao facto de no

interior da estufa haver uma atenuação da variabilidade da temperatura ao longo do dia, pelo que a amplitude térmica diária é menor.

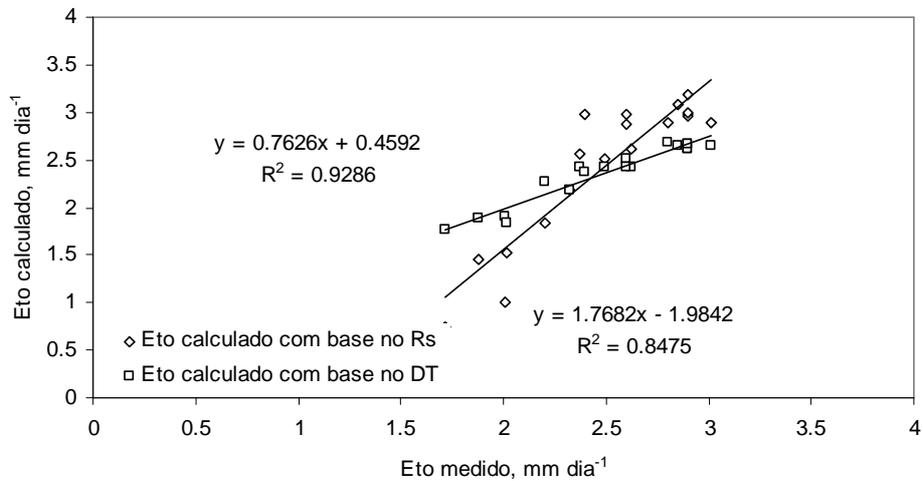


**Figura 2.** Correlação entre a Radiação solar incidente no interior e exterior da estufa, Maio 2011.



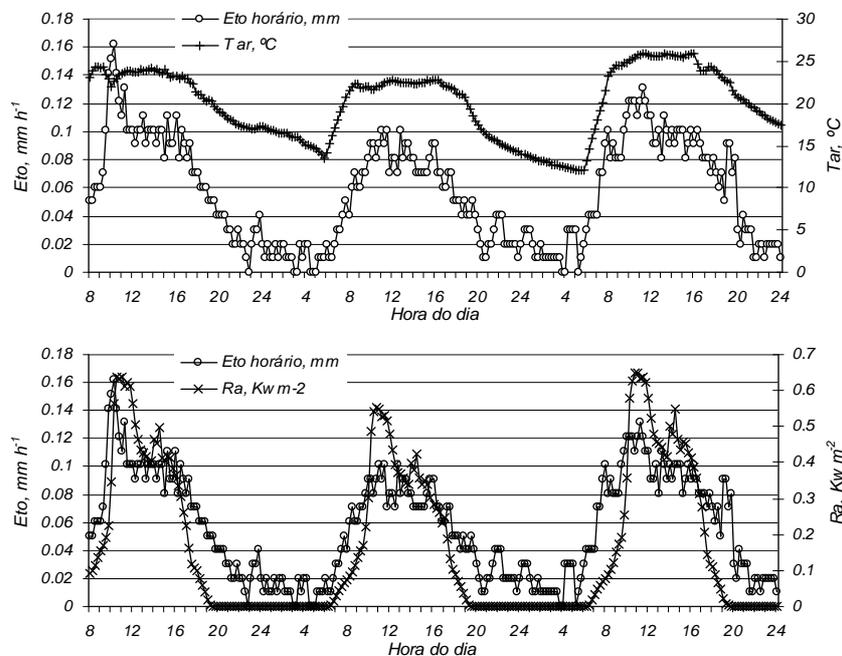
**Figura 3.** Correlação entre a Eto calculada pelo método de HS utilizando a Rs medida e a  $\Delta T$  (Eq. 1 e 3, respectivamente) ao ar livre e no interior da estufa.

A correlação entre as medições diárias realizadas com os lisímetros e os valores calculados utilizando a  $R_s$  e a  $\Delta T$  está apresentada na Figura 4. Verifica-se que existe uma óptima correlação ( $R^2 = 0.93$ ) entre as Eto diárias medidas (média dos 8 lisímetros) e as calculadas com o  $\Delta T$ . A utilização da Radiação solar não melhora os cálculos, resultando efectivamente num  $R^2$  inferior.



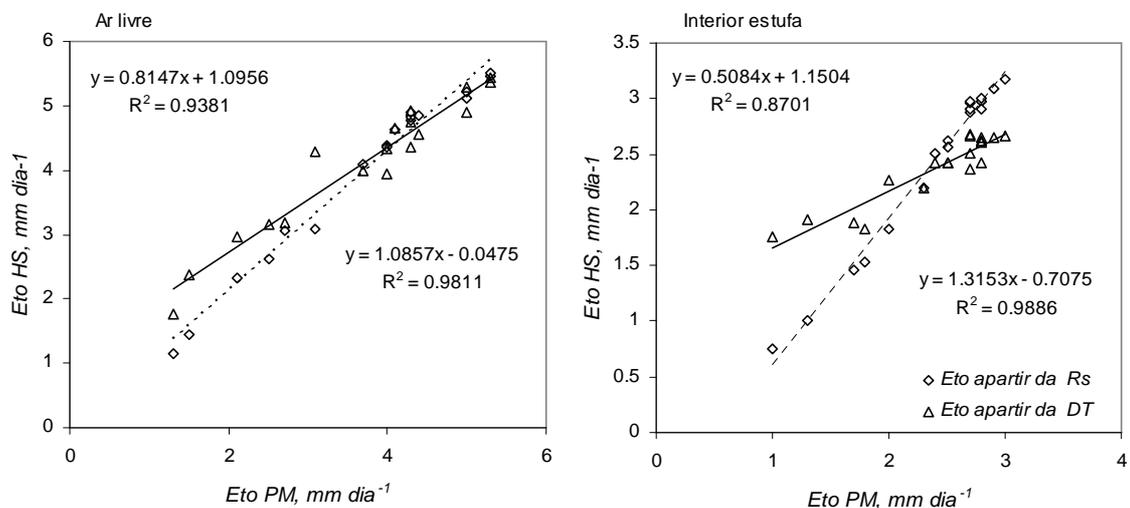
**Figura 4.** Correlação entre a Eto medido com lisímetros e Eto calculado com base no  $R_s$  (Eq. 1) e  $\Delta T$  (Eq. 3).

A evolução da evapotranspiração horária durante 3 dias (18-21 Maio) está apresentada na Figura 5. Verifica-se que as temperaturas na estufa começam a aumentar com os primeiros raios do sol, impulsionando consigo o aumento da evapotranspiração. O valor da Eto horária aumenta até cerca das 10:00 horas, valores esses que se mantêm até por volta das 16:00. Apesar da radiação solar desaparecer por volta das 20:00h, o relvado continua a transpirar a cerca de  $0,02 \text{ mm h}^{-1}$  durante o período nocturno. Ao todo, o período nocturno é responsável por cerca de  $0,3 \text{ mm}$  de evapotranspiração diária.



**Figura 5.** Evapotranspiração horária média medida com lisímetros e a evolução da temperatura e radiação solar, ao longo de 3 dias (18-21 Maio)

Um dos objectivos deste trabalho é verificar se o comportamento da equação de Hargreaves melhora em ambiente protegido, visto a ETo deixar de ser influenciada pelo vento. A Figura 6 apresenta a correlação entre a Eto calculada pelo método de *PM* e a calculada pelo método de *HS* tanto no interior como no exterior da estufa. Verifica-se que quando a Eto *HS* é calculado utilizando a *Rs* (Equação 1), as correlações são excelentes, com  $R^2$  de 0,98 e 0,99 para o ar livre e para o interior de estufa, respectivamente. No entanto, quando a Eto *HS* é calculado utilizando a  $\Delta T$ , verifica-se que os coeficientes de correlação descem para 0,93 e 0,87, respectivamente para o ar livre e interior da estufa. Em todo o caso, tratam-se de valores aceitáveis e que demonstram a viabilidade de utilização da equação de Hargreaves Samani no interior das estufas, salvaguardando naturalmente as devidas calibrações.



**Figura 6.** Correlação entre a Eto calculada pelo método de *PM* e pelo método de *HS* ao ar livre e no interior da estufa. Em ambos os casos a Eto *HS* foi calculada por dois métodos diferentes.

É possível que o declive reduzido da recta de regressão obtido no caso de utilização da  $\Delta T$  seja devido à reduzida aplicabilidade da Equação 2, no interior da estufa. Para verificar essa hipótese, foi realizado uma correlação entre as duas partes da equação para averiguar da sua aplicabilidade em condições protegidas (Figura 7). Verifica-se através da figura que a correlação entre a raiz quadrada da amplitude térmica ( $K_T \Delta T^{0,5}$ ) e a fracção da radiação solar incidente é boa, com um  $R^2$  de 0,88. No entanto, o declive da recta de correlação é 0,36, o que pode indicar a necessidade de calibração da Equação 2 para o cálculo da Eto no interior da estufa, resultante das propriedades do balanço energético característico da estufa.

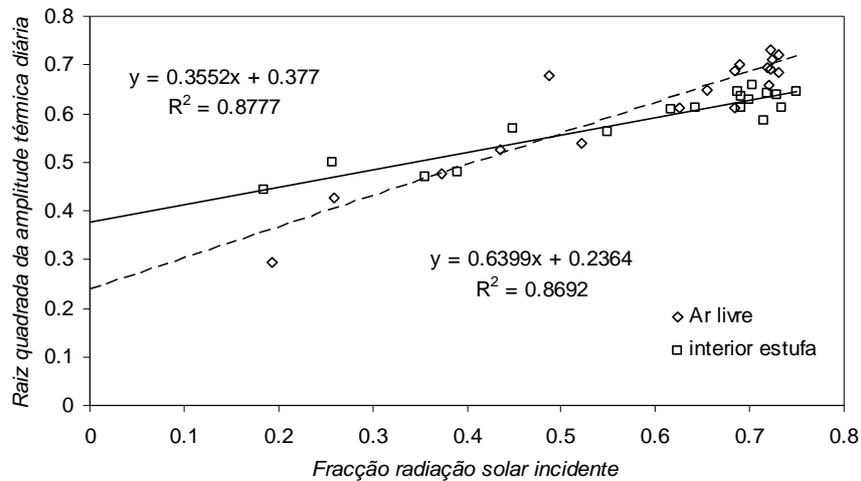


Figura 7. Calibração da Equação 2 para as condições do ensaio

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados demonstram que no interior da estufa a Evapotranspiração é inferior ao ar livre em cerca de 44%, o que permite produzir alimentos utilizando um volume inferior de água. Considerando a escassez global deste recurso, as estufas podem ser consideradas como uma forma de reduzir o consumo mundial da água.

A utilização da equação de Hargreaves Samani no interior de estufas apresenta-se como uma opção viável para a gestão da rega, desde que seja primeiro devidamente calibrada. A calibração deve-se principalmente à redução da  $R_s$  no interior da estufa devido à retenção pelo material de cobertura. Por outro lado, no interior da estufa há um aumento da temperatura mínima e máxima, resultando na diminuição do  $\Delta T$ , que no período em análise passou de 14.6 para 13.2°C, o que altera a dinâmica da equação de Hargreaves.

Verifica-se que quando se utiliza o  $\Delta T$  para o cálculo da  $E_{to}$ , o declive da recta de regressão é 0,76, pelo que este factor deve ser utilizado para calibrar a equação de HS para utilização em estufas.

Verifica-se que quando se utiliza o  $R_s$  para o cálculo da  $E_{to}$ , os resultados se aproximam mais dos valores calculados com a equação de PM. No entanto, quando se utiliza o  $\Delta T$ , os resultados correlacionam-se melhor com as observações do lisímetro. Assim, pode concluir-se que a medição da  $R_s$  no interior da estufa não melhora a qualidade dos resultados obtidos com a equação de HS, para além de representar um custo adicional para o agricultor.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- Allen, R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements*. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy.
- Blaney, H.F., Criddle, e W.D., (1950), *Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data*. USDA/SCS, SCS-TP 96.
- Fernández MD, Bonachela S, Orgaz F, Thompson R, López JC, Granados MR, Gallardo M, Ferrere (2010) *Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate*. Irrigation Science. 28(6): 497-509.
- Jensen, M.E., Haise, H.R., (1963), *Estimating evapotranspiration from solar radiation*. J. Irrig. Drainage Div. ASCE, 89: 15-41.
- Hargreaves, G. H., Allen R. G. (2003). *History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation*. J. Irrig. Drain. Engin., 129(1): 53-63.
- Hargreaves, G.H., Samani, S. (1982) *Estimating potential evapotranspiration*. J. Irrig. Drain. Div., 108~3!, 225–230.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., (1985), *Reference crop evapotranspiration from temperature*. Transaction of ASAE 1(2):96-99.
- Henggeler J.C., Samani, Z., Flynn. M.S., Zeitler JW. (1996). *Evaluation of various evapotranspiration equations for Texas and New Mexico*. Proceeding of Irrigation Association International Conference, San Antonio, Texas
- López-Urrea R., Martín de Santa Olalla F., Fabeiro C., Moratalla A. (2006). *Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate*. Agricultural Water Management 85: 15–26.
- Martínez-Cob, A., Tejeri-Juste, M. (2004) *A wind-based qualitative calibration of the Hargreaves ETo estimation equation in semiarid regions*. Agric. Water Manag. 64:251–264.
- Moller M, Assouline S. (2007) *Effects of a shading screen on microclimate and crop water requirements*. Irrigation Science. 25:171–181
- Samani, Z. (2000). *Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data*. J Irrig Drain Engin. 126(4):265–267.