

# Desenvolvimento dum sistema de rega automático, autónomo e adaptativo – Estudo comparativo de cinco métodos para o cálculo da ETo

*Shahidian, S.<sup>1</sup>, Serralheiro, R.P.<sup>2</sup>, Teixeira, J.L.<sup>3</sup>, Santos, F.L.<sup>4</sup>, Rosário, M.C.<sup>5</sup>, Costa, J.L.<sup>6</sup>,  
Toureiro, C.<sup>7</sup>, Haie, N.<sup>8</sup>*

## Resumo

Para efeitos de desenvolvimento dum sistema de rega automático, são estudados e calibrados cinco métodos de cálculo de Evapotranspiração de referência (Priestley-Taylor, Makkink, Hargreaves, Turc, Jensen-Haise) utilizando apenas os parâmetros climáticos temperatura,  $T$ , e radiação solar,  $R_s$ . O estudo envolve o cálculo da Evapotranspiração para todos os dias do ano hidrológico 2005/06 e a sua comparação com o método de Penman-Monteith. A estação escolhida para o estudo é a estação de Divor.

Nas condições do estudo (Sul da Península Ibérica) os melhores resultados são obtidos com os métodos de Priestley-Taylor e Jensen-Haise. São apresentados os coeficientes de calibração para todos os cinco métodos para a zona do estudo, por forma a aproximar ao máximo os resultados aos obtidos pelo método de referência.

## Abstract

In order to develop an automatic irrigation system, a set of five different methods for calculating reference evapotranspiration are studied and calibrated (Priestley-Taylor, Makkink, Hargreaves, Turc, Jensen-Haise). These methods use temperature,  $T$ , and solar radiation,  $R_s$ , to calculate evapotranspiration. Evapotranspiration is calculated for all the days of the 2005/06 hydrological year at the Divor meteorological station. The results are compared to, and calibrated against, the Penman-Monteith method.

The best results are obtained by the Priestley-Taylor and Jensen-Haise methods. Calibration coefficients are also calculated for all five methods, so that the results can be as close as possible to those produced by the Penman-Monteith method.

**Palavras-chave:** Penman-Monteith, Priestley-Taylor, Makkink, Hargreaves, Turc, Jensen-Haise

## 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho está inserido num projecto de desenvolvimento duma família de controladores de rega com ajustamento automático da dotação à evapotranspiração diária no local. Os controladores devem ser simples e económicos, recorrendo à monitorização de apenas um ou dois parâmetros climáticos para o cálculo da ETo. Pretende-se que o sistema tenha a simplicidade e a economia dos populares programadores de rega, e a economia da água associada aos sistemas de controlo de rega baseados em estações meteorológicas.

Este trabalho representa a primeira etapa desse projecto, ou seja a selecção dos parâmetros e dos métodos que satisfazem os critérios de simplicidade e rigor na determinação da ETo nas condições de sul da Península Ibérica.

---

<sup>1</sup> Professor Auxiliar, Universidade de Évora

<sup>2</sup> Professor Catedrático, Universidade de Évora

<sup>3</sup> Professor Associado, Instituto Superior de Agronomia

<sup>4</sup> Professor Associado, Universidade de Évora

<sup>5</sup> Professora Catedrática, Universidade de Évora

<sup>6</sup> Director, Câmara Municipal de Évora

<sup>7</sup> Bolseira Doutoramento, Universidade de Évora

<sup>8</sup> Professor Associado, Universidade do Minho

## 2. OBJECTIVOS

Neste trabalho vai-se avaliar a evapotranspiração calculada por cinco modelos simples de cálculo da ETo, que utilizam apenas os parâmetros climáticos temperatura e radiação solar. Os resultados obtidos são comparados com os do método de Penman-Monteith, que servirá como método de referência. Os modelos utilizados são: Priestley-Taylor, Makkink, Hargreaves, Turc e Jensen-Haise. Pretende-se não só averiguar o rigor destes métodos no clima mediterrâneo (Estação climatológica de Divor), mas também calibrá-los e calcular os parâmetros de ajustamento que permitem a sua melhor utilização nas condições pretendidas.

## 3. BREVE APRESENTAÇÃO DOS MÉTODOS SELECIONADOS

O termo evapotranspiração de referência, ETo, foi definido por Doorenbos e Pruitt (1977) como aquela que ocorre em uma extensa superfície coberta com relva de 0,08 a 0,15 m, em crescimento activo, cobrindo totalmente o solo e sem deficiência de água. Quando não é possível medir a ETo, ela pode ser calculada a partir de modelos de ET utilizando parâmetros climáticos.

Existem diversos modelos para a determinação da ETo, que vão desde as mais complexas equações de energia necessitando de muitos parâmetros climatológicos (Penman-Monteith, Allen, 1989) à equações mais simples que necessitam apenas de alguns parâmetros (Blaney-Cridde, 1950, Hargreaves-Samani, 1982, 1985). Efectivamente, os parâmetros mais importantes para o cálculo da ETo são a temperatura e a radiação solar (Samani, 1998). Segundo Jensen (1985), pelo menos 80% da ETo pode ser explicada pela temperatura e a radiação solar.

Pode-se dividir os modelos de evapotranspiração em três tipos básicos: a) os de temperatura, b) os de radiação e c) os de combinação dos dois (Jensen et al. 1990, Dingman 1994, Watson e Burnett 1995). Os modelos mais simples são os que apenas necessitam de registos de temperatura do ar para calcularem o ETo (e.g., Thornthwaite 1948, Doorenbos e Pruitt 1977). Os modelos de radiação (e.g., Turc 1962, Doorenbos e Pruitt 1977, Hargreaves e Samani 1985) utilizam um componente do balanço energético e normalmente exigem a existência de medições da radiação. Por fim, os modelos de combinação (e.g., Penman 1948) utilizam ambos os elementos do balanço energético e da transferência de massa para produzir resultados precisos (Jensen et al. 1990). No presente trabalho se irá estudar cinco diferentes modelos de “radiação” e comparar os resultados obtidos com o método de Penman-Monteith.

### 3.1 O método Penman-Monteith (FAO 56)

O modelo “de combinação” mais comum é a chamada equação de Penman-Monteith (Jensen et al. 1990, Allen et al. 1998). Ao longo dos últimos anos este modelo tem demonstrado a sua adaptabilidade e robustez e é hoje aceite como fornecendo um cálculo bastante fiel da ETo, e como tal será utilizado como o método de referência para a calibração dos restantes métodos.

O método de Penman-Monteith para além da localização da estação, necessita de quatro parâmetros climáticos: temperatura, humidade relativa, vento e radiação líquida.

O modelo pode ser expresso da seguinte forma:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (1)$$

em que:

- $ET_o$  a evapotranspiração de referência, mm/dia;
- $R_n$  radiação líquida na superfície da cultura, MJ/m<sup>2</sup>/dia;
- $G$  densidade do fluxo de calor do solo, MJ/m<sup>2</sup>/dia;
- $T$  temperatura média diária a 2m de altura, °C;
- $u_2$  velocidade do vento a 2m de altura, m/s;
- $e_s$  pressão da saturação de vapor, kPa;
- $e_s - e_a$  défice de pressão de saturação de vapor;
- $\Delta$  declive da curva de pressão de vapor, kPa /°C
- $\gamma$  constante psicrométrico, kPa/°C

O cálculo dos diversos parâmetros referidos é feito segundo metodologia própria que permite a sua determinação na ausência de qualquer um dos outros parâmetros (Allen et al. 1998).

### 3.2 O modelo de Priestley-Taylor

O método de Priestley-Taylor (Priestley-Taylor 1972; De Bruin, 1983) é uma forma simplificada do método de Penman-Monteith (Allen et al. 1998), que apenas necessita da radiação e da temperatura para o cálculo da ETo. Esta simplificação baseia-se no facto da evapotranspiração ser mais dependente da radiação do que da humidade do ar e do vento. Esses autores verificaram que o componente radiação era responsável por cerca de 2/3 da ETo. Assim, propõem o cálculo do componente da ETo resultante directamente da radiação e a sua majoração por um coeficiente,  $\alpha$ , que pode ser calibrado de acordo com as condições locais (normalmente utilizam-se valores de 1,12 ou 1,26).

$$ET_o = \alpha \frac{\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma} + \beta \quad (2)$$

Xu e Singh calibraram o modelo para as condições de Suíça e obtiveram os valores de 0,98 e 0,94 para  $\alpha$  e  $\beta$ , respectivamente.

### 3.3 O modelo de Makkink

O método de Makkink (Makkink, 1957) pode ser considerado como uma forma simplificada do método Priestley-Taylor, necessitando também da radiação e da temperatura para o cálculo do ETo. A diferença consiste no facto de em vez da radiação líquida,  $R_n$ , e da temperatura, o método de Makkink utilizar a radiação incidente da onda curta,  $R_s$ , e a temperatura. Isto é possível porque existe uma relação entre a radiação líquida ( $R_n$ ) e a radiação de onda curta ( $R_s = \text{aprox } 2 R_n$ ).

Makkink desenvolveu em 1957 este método para estimar a ETo nas condições climáticas de Holanda:

$$Et_o = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{2,45} + \beta \quad (3)$$

Em que o  $\alpha$  toma normalmente o valor de 0,61, e  $\beta$  - 0,012. Xu e Singh (2000) recalibraram o modelo para as condições de Suíça e obtiveram os valores de 0,77 e 0,2 para  $\alpha$  e  $\beta$ , respectivamente.

### 3.4 O modelo de Hargreaves

O cálculo da ETo pelo método de Hargreaves (Hargreaves, 1975) pode ser realizado recorrendo aos parâmetros temperatura e radiação líquida (Método de Hargreaves) ou apenas à Temperatura (Método de Hargreaves-Samani). No segundo caso, em vez da medição da Radiação solar incidente,  $R_s$ , recorre-se a tabelas para o cálculo da radiação extraterrestre,  $R_a$ , que depois é convertido em  $R_s$ . Assim, o modelo original de Hargreaves pode ser expresso como:

$$ET_0 = \alpha(T + 17,78)R_s \quad (4)$$

onde  $\alpha$  é 0,0135 e  $R_s$  é a radiação solar incidente convertido a profundidade de água, mm/dia. A radiação solar pode ser expressa em Mega Joules por m<sup>2</sup> (MJ/m<sup>2</sup>), e a equação passa a ser :

$$ET_0 = \alpha(T + 17,78)R_s \left( \frac{238,8}{595,5 - 0,55T} \right) \quad (5)$$

em que  $\alpha$  é 0,0135, e  $R_s$  é a radiação solar incidente expressa em MJ/m<sup>2</sup>/dia.

Em 1982 e 1985 Hargreaves e Samani propuseram várias melhorias importantes à equação original de 1975 para o cálculo da ETo. Assim o modelo Hargreaves-Samani pode ser expresso da seguinte forma:

$$ET_0 = \alpha R_a (T + 17,78)(T_{\max} - T_{\min})^{0,5} \quad (6)$$

Em que  $\alpha$  é 0,0023 e a relação  $T_{\max}-T_{\min}$  corresponde à diferença entre a temperatura máxima e mínima diária. Santos e Maia (2005) compararam os valores obtidos por este método com os de Penman e chegaram a conclusão que para a região de Alentejo, este método sobre-estima o valor de ETo em cerca de 10%. No presente estudo se irá utilizar a equação de Hargreaves (Equação 5) com os dois parâmetros de radiação e temperatura medidos.

### 3.5 O Modelo de Turc

Um outro método utilizando apenas dois parâmetros é o método proposto por Turc (1963), que foi especialmente concebido para os climas húmidos de Europa Ocidental (França). O método baseia-se nos valores médios de radiação solar diário e a temperatura, pelo que pode ser utilizado para qualquer intervalo de número de dias. A equação de Turc pode ser expresso como:

$$ET_p = \alpha((23,9001R_s) + 50) \left( \frac{T}{T+15} \right) \quad (7)$$

Em que  $\alpha$  é 0,01333 e  $R_s$  é expressa em MJ/m<sup>2</sup>/dia.

### 3.6 O Modelo de Jensen e Haise

Um modelo semelhante é o de Jensen e Haise (1963) que foi determinado para os Estados mais áridos da América:

$$ET_0 = \alpha \frac{T R_s}{2,450} + \beta \quad (8)$$

Em que  $\alpha$  é 0,025 e  $\beta$  é 0,08.

Duma forma geral Amatya et al. (1995) estudaram vários métodos de cálculo da ETo e verificaram que o modelo de Turc era o melhor ao nível mensal e anual. Ao nível diário, o modelo de Turc foi o melhor em apenas um local enquanto que os modelos de Priestley-Taylor e Makkink foram os mais satisfatórios na maioria dos locais. Os mesmos autores também verificaram que o modelo de Makkink geralmente subestima o valor de ETo nos meses de maior calor, enquanto que o método de Hargreaves e Samani tendia a sobrestimar o ETo.

## 4. METODOLOGIA DO ESTUDO

Por forma a estudar a capacidade dos vários métodos para prever a ETo nas condições do Alentejo, foram calculados os valores diários de ETo pelos diferentes métodos para o ano hidrológico 2005/2006, utilizando os valores climáticos diários registados na estação de Barragem de Divor (Estação 21J/03C da rede meteorológica nacional, com a altitude de 260m). Esses dados foram recolhidos pelo INAG e disponibilizados na sua página da Internet.

Para o efeito foi preparada uma folha de cálculo que determina a ETo diário para todos os dias do ano utilizando o método de Penman-Monteith e os cinco métodos estudados neste trabalho.

Uma vez calculada a ETo diária para cada dia do ano, os resultados foram comparados com os do método de Penman-Monteith de forma a determinar o coeficiente de determinação,  $r^2$ , para cada um dos métodos. O declive e a ordenada na origem da recta de correlação depois serviram para calibrar os métodos para o clima de Divor.

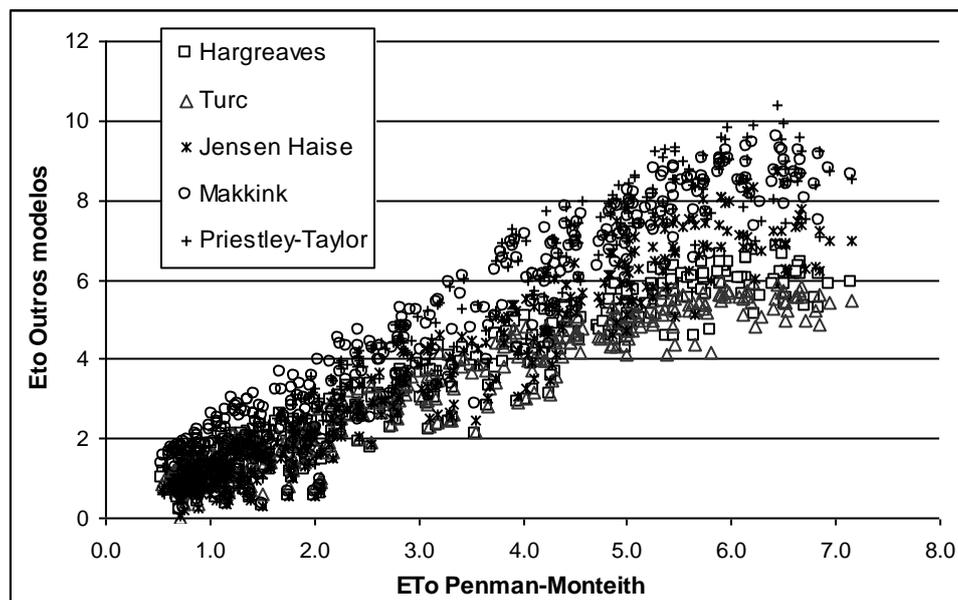
Por forma a eliminar a variação diária inerente aos fenómenos climáticos, utilizaram-se também médias móveis de cinco dias para estudar a correlação dos diferentes métodos com o método de referência.

## 5. RESULTADOS

Foram recolhidos dados do dia 2 de Outubro de 2005 a 30 de Setembro de 2006 ou seja um total de 364 dias. Para o cálculo da ETo pelo método de Penman-Monteith foram utilizados os parâmetros temperatura máxima e mínima, humidade relativa máxima e mínima, a velocidade do vento e a radiação solar. Para o cálculo da ETo pelos cinco métodos estudados foram utilizados a radiação e a temperatura máxima, média e mínima.

Na figura 1 estão apresentados os valores calculados pelos cinco métodos. Os resultados indicam que todos os métodos estudados produzem valores aceitáveis, tendo em atenção o número reduzido de parâmetros necessários para o seu cálculo.

Através da análise da figura verifica-se que nos dias de menor evapotranspiração, os métodos calculam valores relativamente semelhantes e muito próximas dos calculados pelo método de Penman-Monteith. A medida que aumenta a evapotranspiração, surgem maiores divergências entre os valores calculados. Verifica-se que os métodos de Turc e de Hargreaves originam valores inferiores ao do método de Penman-Monteith, enquanto os restantes métodos originam valores superiores. O método proposto por Priestley-Taylor é aquele que resulta em valores máximos de ETo, enquanto que o método de Turc é aquele que calcula os valores mais baixos. Os resultados obtidos pelo método de Turc podem se dever ao facto do método estar calibrado para as condições húmidas de França, impondo-se portanto a sua calibração às condições do sul da Península Ibérica.

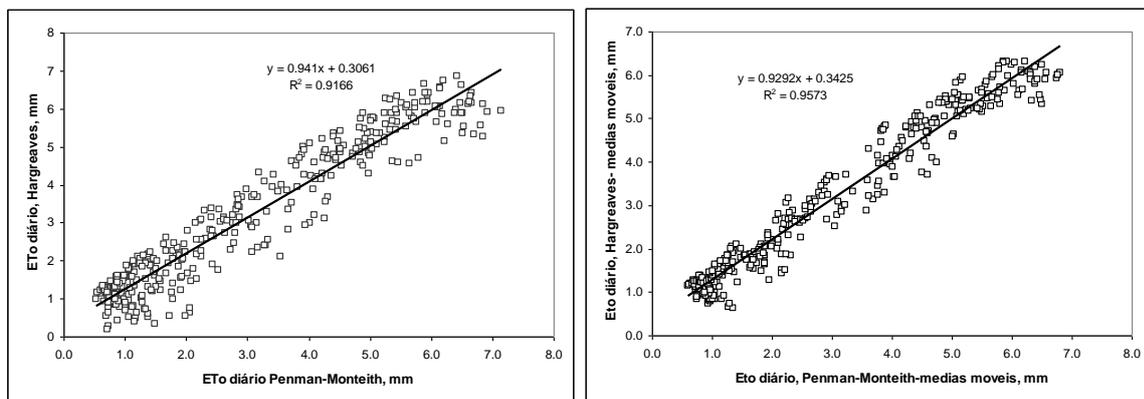


*Figura 1. Correlação entre os valores de Evapotranspiração de referência obtidos pelos diferentes métodos com os valores obtidos pelo método de Penman-Monteith.*

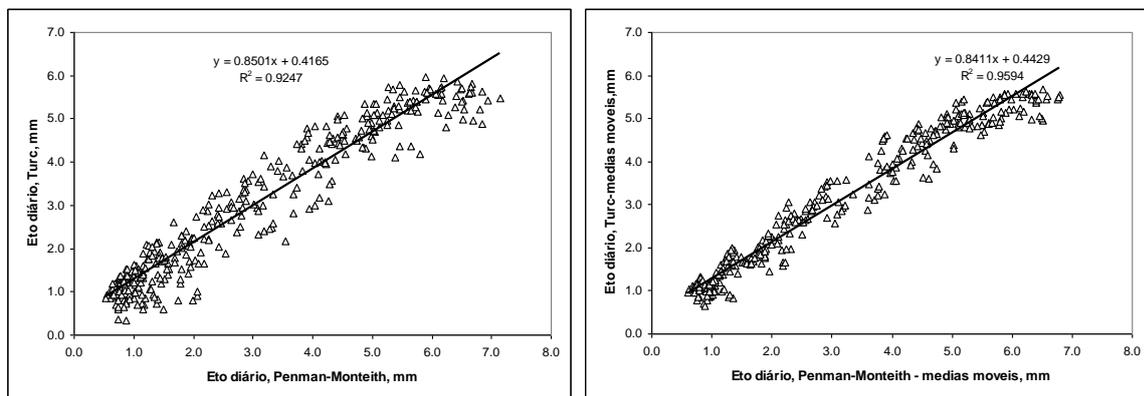
Dentre os métodos estudados verifica-se que aquele que se correlaciona melhor com o método de Penman-Monteith em termos de ETo diário é o método de Priestley-Taylor (Figuras 2-6). Este resultado é facilmente explicável visto o método derivar directamente do método Penman-Monteith e ser o método mais próximo àquele. Em termos de médias móveis de cinco dias é já o método proposto por Jensen-Haise, que se correlaciona melhor com o método de referência, apresentando um coeficiente de determinação de 0,97.

No outro extremo, o método de Hargreaves é aquele que tem um coeficiente de determinação mais baixo (0,92), quando comparado com o método de Penman-Monteith.

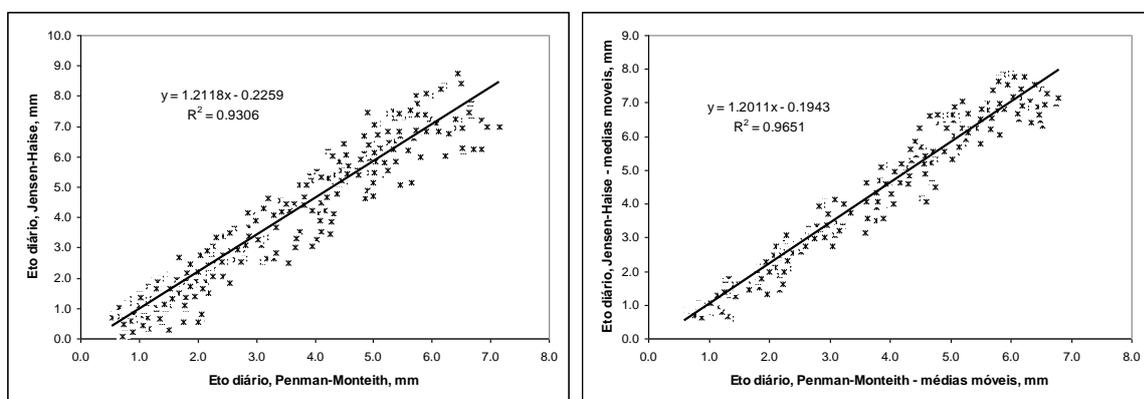
Deve-se referir que a obtenção de estes coeficientes de determinação altos deve-se em parte à dimensão da amostra utilizada. Efectivamente, quando se reduz o intervalo de tempo considerado, verifica-se que a correlação deixa de ser tão boa e há uma maior discrepância entre os resultados obtidos por cada um dos métodos obtidos através da equação de referência.



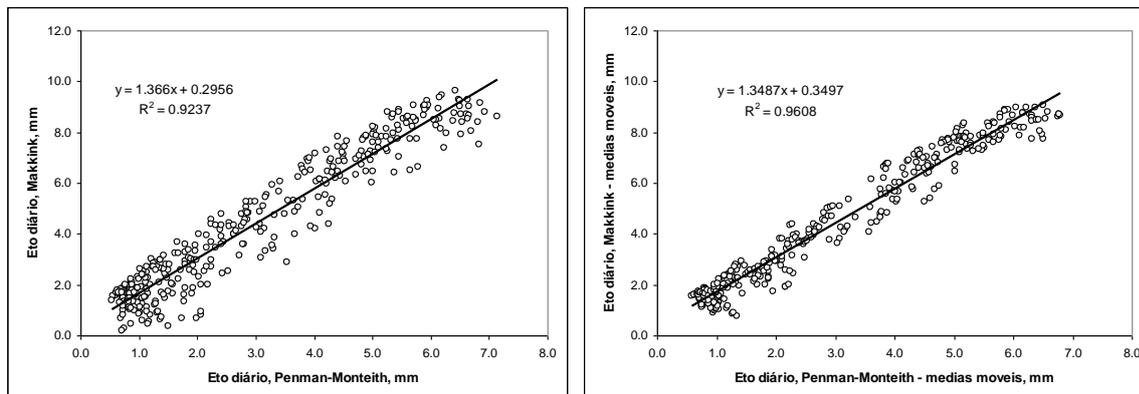
**Figura 2.** Comparação dos resultados obtidos pelo método de Hargreaves com os do método de Penman-Monteith (Esquerda: valores diários. Direita: médias móveis).



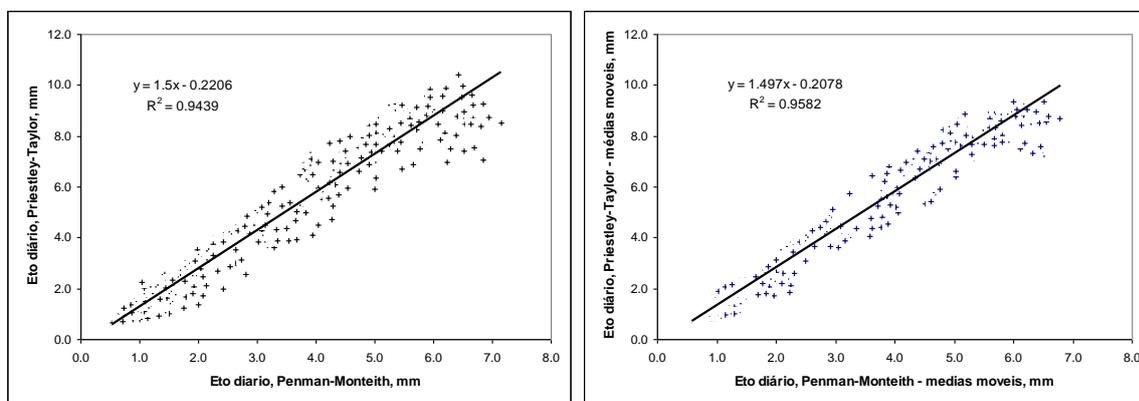
**Figura 3.** Comparação dos resultados obtidos pelo método de Turc com os do método de Penman-Monteith (Esquerda: valores diários. Direita: médias móveis).



**Figura 4.** Comparação dos resultados obtidos pelo método de Jensen-Haise com os do método de Penman-Monteith (Esquerda: valores diários. Direita: médias móveis).



**Figura 5.** Comparação dos resultados obtidos pelo método de Makkink com os do método de Penman-Monteith (Esquerda: valores diários. Direita: médias móveis).



**Figura 6.** Comparação dos resultados obtidos pelo método de Priestley-Taylor com os do método de Penman-Monteith (Esquerda: valores diários. Direita: médias móveis).

A partir das figuras 2-6 e utilizando os declives e ordenadas na origem das rectas de regressão é possível calibrar os cinco métodos para o clima de Divor. Assim foram recalculados os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  para as diferentes equações por forma a aproximar os resultados o mais possível aos obtidos pelo método de referência (Quadro 1).

**Quadro 1.** Coeficientes de regressão, coeficientes originais e os coeficientes calibrados para os cinco métodos estudados

Método	$R^2$		Coef. Originais		Coef. Calibrados	
	Diário	Medias Mov	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
Priestley-Taylor	0,94	0,96	1,26	-	0,640	0,220
Makkink	0,92	0,96	0,61	-0,012	0,447	-0,308
Hargreaves	0,92	0,96	0,0135	-	0,014	-0,306
Turc	0,92	0,96	0,01333	-	0,016	-0,410
Jensen-Haise	0,93	0,97	0,025	0,08	0,021	0,023

## 6. CONCLUSÕES

Foram estudados cinco métodos para o cálculo de ETo diário a partir da Radiação solar,  $R_s$ , e Temperaturas diárias,  $T$ ,  $T_{max}$  e  $T_{min}$ . Verifica-se que numa forma geral todos os métodos resultam em valores que são aceitáveis. O método proposto por Priestley-Taylor é aquele que mais de perto acompanha os resultados do método de Penman-Monteith. Quando se recorre a médias móveis de cinco dias, o método de Jensen-Haise proporciona um coeficiente de regressão de 0,97, o que é suficiente para a sua utilização na gestão de um sistema de rega.

Paralelamente a estes resultados foi possível calibrar os cinco métodos para as condições do Posto da Barragem do Divor (Quadro 1) o que poderá ser útil para a utilização destas equações na Península Ibérica.

## BIBLIOGRAFIA

Allen, R., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., (1998), *Crop Evapotranspiration, Guidelines for Computing Crop Water Requirements*, FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome – Italy. 1998.

Allen, R.G. (1989) *A penman for all seasons*, J. Irrig. and Drain Engr., ASCE, 112(4):349-368.

Amatya, D.M, Skaggs, R.W., Gregory. J.D., (1995), *Comparison of Methods for Estimating REF-ET*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 121(6):427-435

Jensen, M.E., Haise, H.R., (1963), *Estimating evapotranspiration from solar radiation*. J. Irrig. Drainage Div. ASCE, 89: 15-41.

Blaney, H.F., Criddle, e W.D., (1950), *Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data*. USDA/SCS, SCS-TP 96.

Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., (1982), *Estimating potential evapotranspiration*. J. Irrig. and Drain Engr., ASCE, 108(IR3):223-230.

Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., (1985), *Reference crop evapotranspiration from temperature*. Transaction of ASAE 1(2):96-99.

Samani, Z., (1998), *Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration using minimum climatological data* (Hargreaves-Samani equation)

Santos, M., Maia, J., (2005), *Calibração da ETo estimada pelo método de Hargreaves e tina evaporimétrica Classe A*, Congresso Nacional de rega e drenagem, Beja

Turc, L., (1963), *Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formulation simplifié et mise à jour*. Ann. Agron., 12: 13-49

Wu, I-P., (1997), *A Simple Evapotranspiration Model for Hawaii: The Hargreaves Model*. CTAHR Fact Sheet, Engineers's Notebook n° 106

Zhao C., Nan, Z., Cheng, G., (2005) *Evaluating Methods of Estimating and Modelling Spatial Distribution of Evapotranspiration in the Middle Heine River Basin, China*, AJES 1 (4): 278-285.