

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

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

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.

¹ Professor Auxiliar, Universidade de Évora

² Professor Catedrático, Universidade de Évora

³ Professor Associado, Instituto Superior de Agronomia

⁴ Professor Associado, Universidade de Évora

⁵ Professora Catedrática, Universidade de Évora

⁶ Director, Câmara Municipal de Évora

⁷ Bolseira Doutoramento, Universidade de Évora

⁸ 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/m²/dia;
- G densidade do fluxo de calor do solo, MJ/m²/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;
- Δ declive da curva de pressão de vapor, kPa /°C
- γ 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, α , 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 α e β , 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 α toma normalmente o valor de 0,61, e β - 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 α e β , 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 α 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^2 (MJ/m^2), 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 α é 0,0135, e R_s é a radiação solar incidente expressa em MJ/m^2 /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 α 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 α é 0,01333 e R_s é expressa em MJ/m²/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 α é 0,025 e β 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.

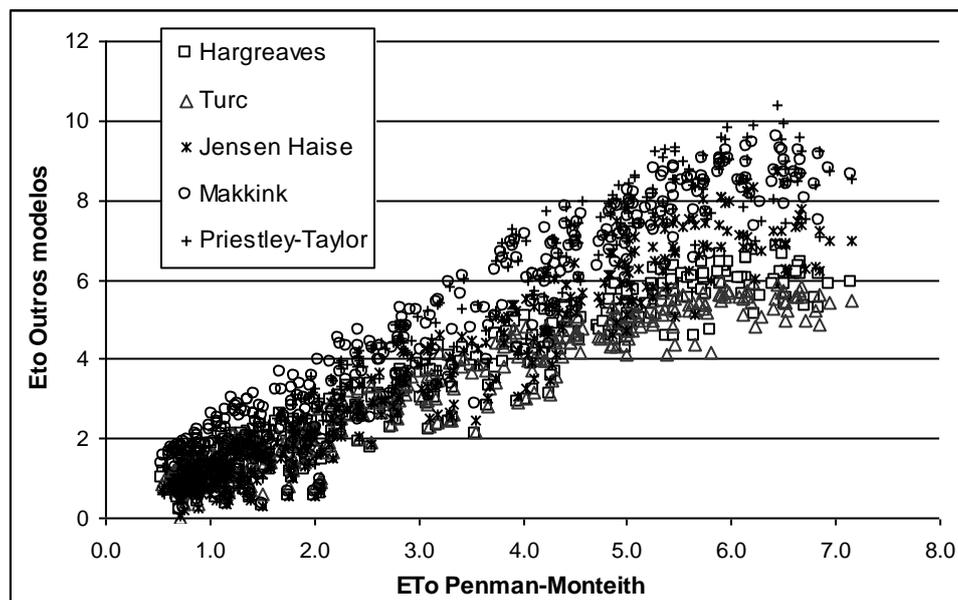


Figura 1. Correlação entre os valores de Evapotranspiração de referência obtidos pelos diferentes métodos com os valores obtidos pelo método de Penman-Monteith.

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.

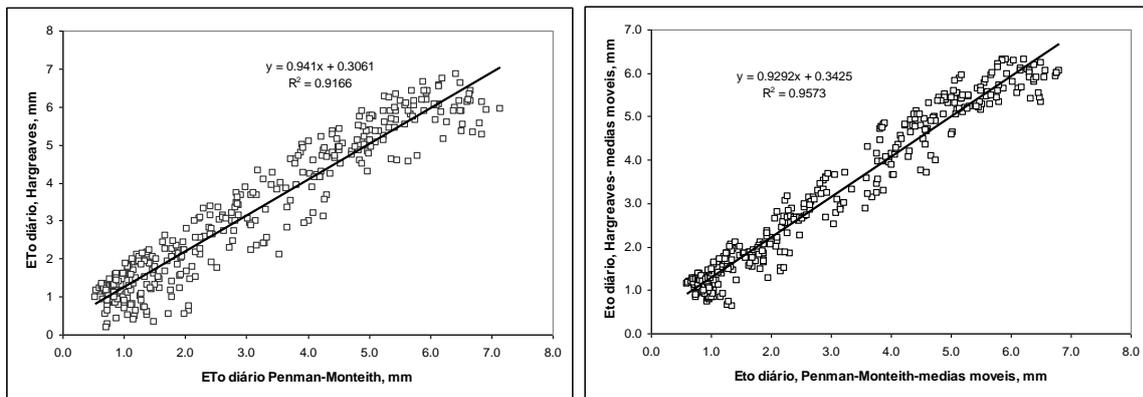


Figura 2. Comparação dos resultados obtidos pelo método de Hargreaves com os do método de Penman-Monteith (Esquerda: valores diários. Direita: médias móveis).

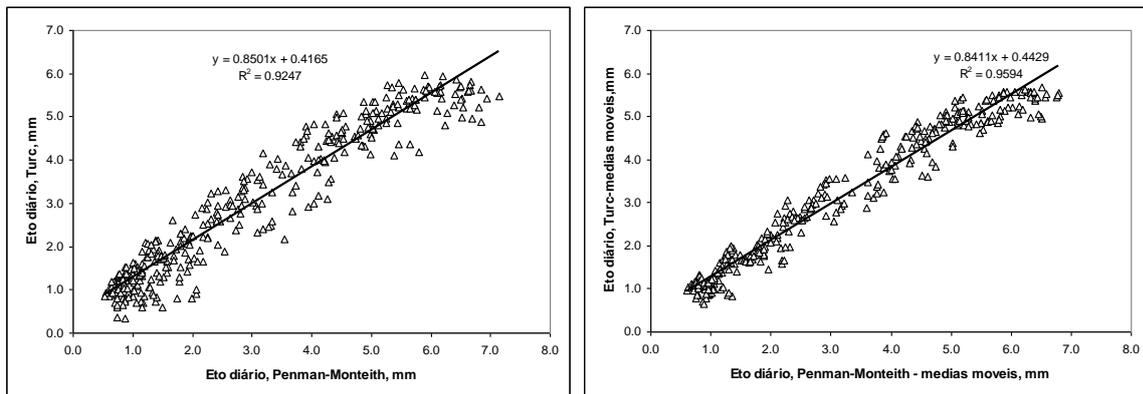


Figura 3. Comparação dos resultados obtidos pelo método de Turc com os do método de Penman-Monteith (Esquerda: valores diários. Direita: médias móveis).

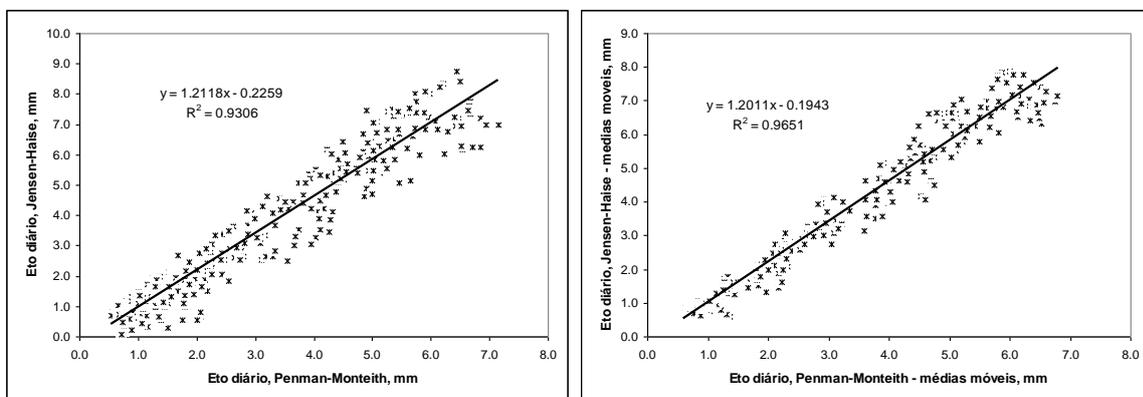


Figura 4. Comparação dos resultados obtidos pelo método de Jensen-Haise com os do método de Penman-Monteith (Esquerda: valores diários. Direita: médias móveis).

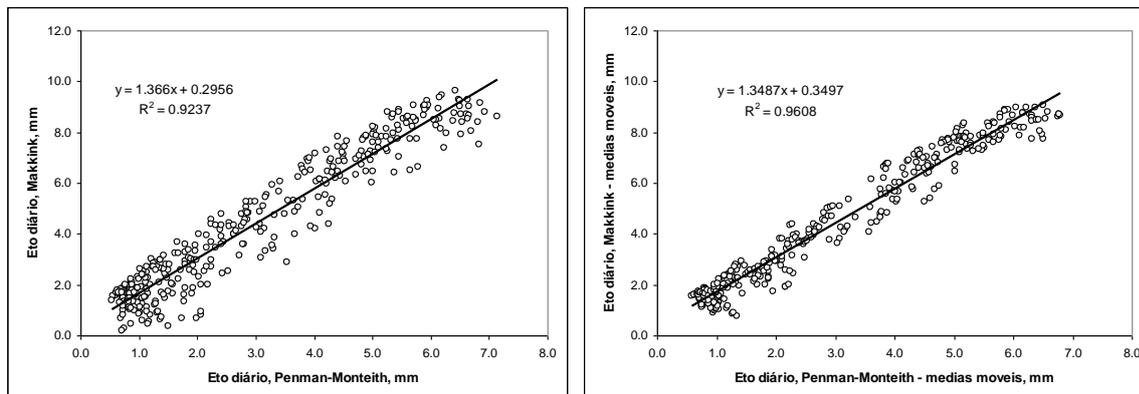


Figura 5. Comparação dos resultados obtidos pelo método de Makkink com os do método de Penman-Monteith (Esquerda: valores diários. Direita: médias móveis).

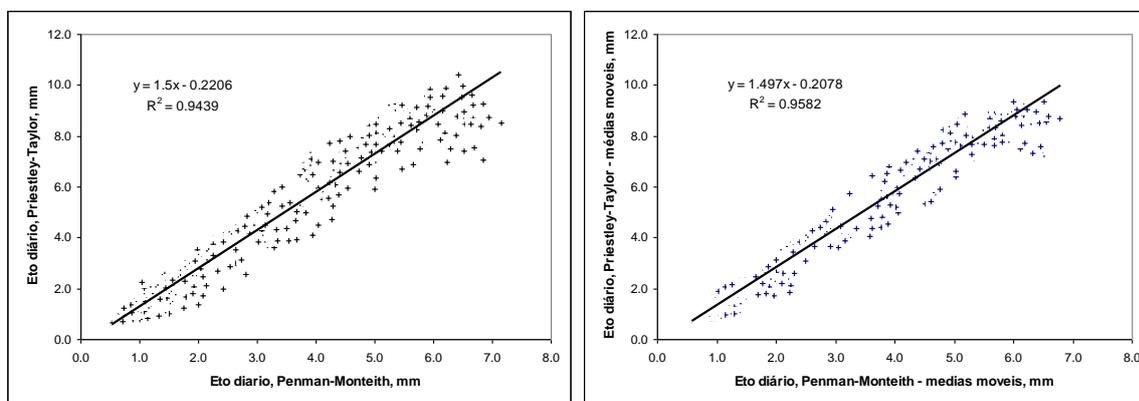


Figura 6. Comparação dos resultados obtidos pelo método de Priestley-Taylor com os do método de Penman-Monteith (Esquerda: valores diários. Direita: médias móveis).

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 α e β 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	α	β	α	β
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.