

ESTIMATIVAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REGIONAL EM PRESIDENTE PRUDENTE, SP, USANDO O MODELO CONCEITUAL DE RELAÇÃO COMPLEMENTAR DE MORTON

Clóvis Angeli Sansigolo, Raimundo de Oliveira Roque
Divisão de Ciências Meteorológicas, INPE, São José dos Campos, SP
e-mail : sansigol@met.inpe.br

ABSTRACT

Morton's complementary relationships conceptual model was used to estimate the monthly averages of potential and regional evapotranspiration rates at Presidente Prudente, São Paulo. The model performance was verified in comparison to Penman's estimates in the period 1976-97. Regional evapotranspiration rates, ranging from 4.3 mm/day in summer to 0.5 mm/day in winter, 40% of potentials, were obtained. The wet environment evaporation rates defined by Morton were close to the ones estimated by Penman's method. Morton's model provided more realistic and consistent potential and regional evapotranspiration rates, obtained from their effects on the routine climatological observations, used to calculate potential evapotranspiration.

1. INTRODUÇÃO

Estimativas confiáveis de evapotranspiração regional são essenciais no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos para fins hidrológicos, agrícolas e ambientais. O desenvolvimento de métodos baseados em observações climatológicas de rotina ainda é um desafio à ciência e aplicação meteorológica.

Os métodos convencionais para estimar evapotranspiração são baseados na suposição de que a evapotranspiração potencial é independente da regional, podendo portanto, ser usada para representar a demanda evaporativa de uma área. Tal suposição ignora o fato bem conhecido, que um decréscimo na evapotranspiração regional, causado pela redução na disponibilidade de água no solo, provoca um aumento na temperatura e decréscimo na umidade do ar sobre a região e este, por sua vez, leva a um aumento na evapotranspiração potencial.

Evapotranspiração potencial geralmente refere-se à taxa máxima de evaporação de uma grande área, uniformemente coberta de vegetação em ativo crescimento, com adequado suprimento de água. Como normalmente as medidas e estimativas são pontuais, estas são aplicáveis somente a áreas muito pequenas, de tal forma que a evaporação nestas superfícies não modifica as observações.

Bouchet (1963) formulou a hipótese que as variações na evapotranspiração potencial e regional são complementares devido às variações na disponibilidade de água no solo. Este conceito foi subsequentemente desenvolvido por Morton (1971), Seguin (1975), Fortin & Seguin (1975) e Kovacs (1987).

O conceito de relação complementar entre evapotranspiração potencial e regional é baseado na interação entre a superfície evaporante e o ar circulando no ambiente. A relação contorna a complexidade do sistema solo-planta-atmosfera de modo que a evapotranspiração regional possa ser estimada a partir de seus efeitos sobre a temperatura e umidade do ar rotineiramente observadas, que são usadas nas estimativas de evapotranspiração potencial.

Uma racionalização e revisão sobre o conceito de relação complementar, esquematizado na figura 1, foi realizada por Morton (1983), que também apresenta resultados relacionados à verificação deste método em bacias hidrográficas na América do Norte, África e Oceania.

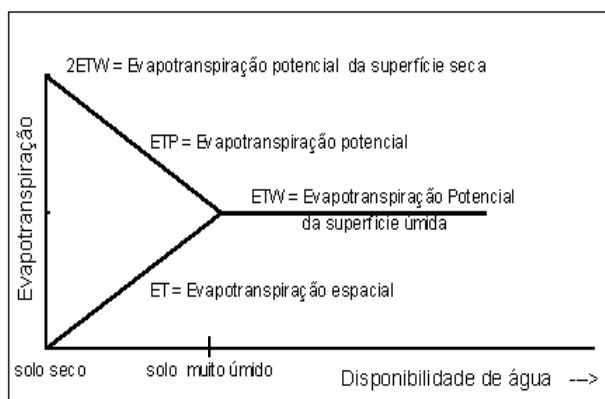


Figura 1. Representação esquemática da relação complementar entre evapotranspiração potencial e regional (espacial), sob suprimento constante de energia radiante (Morton, 1983).

Lemeur & Zhang (1990) avaliaram comparativamente, usando análise de sensibilidade, 3 modelos de estimativa de evapotranspiração na bacia do rio Xinjiang, com 4684 km², numa região semi-árida da China. Eles concluíram que os 3 métodos: Advecção-Aridez (Brutsaert & Stricker, 1979), Relação Complementar (Morton, 1983) e Penman-Monteith (Monteith, 1981) tiveram um bom desempenho em comparação aos balanços hídricos anuais e podem ser aplicados em regiões semi-áridas. A principal vantagem do modelo de Morton (1983a) é que ele não necessita de calibração local como os demais.

No Brasil, Marcelino (1998) e Marcelino & Leopoldo (1998) investigaram a validade do modelo de Morton (1983a) para estimativas médias mensais de 14 anos de evapotranspiração potencial e regional nas diferentes regiões do Estado de São Paulo e concluíram que ele apresentou boa concordância com as estimativas feitas pelo método de Penman. Eles também verificaram que no oeste do Estado, onde predomina um clima mais seco, o método de Penman apresentou melhores concordâncias com as estimativas de evapotranspiração potencial do ambiente úmido de Morton.

O objetivo deste trabalho é a implementação e verificação comparativa com o método de Penman, do modelo de Relação Complementar de Morton para estimativas das taxas médias mensais climatológicas (1976-97) de evapotranspiração regional em Presidente Prudente, SP.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os dados climatológicos utilizados foram as médias mensais, no período de 1976 a 97, de temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, precipitação e insolação da estação da UNESP, em Presidente Prudente, SP (latitude -22°07' e longitude -51°23' e altitude 435 m).

As estimativas de evapotranspiração regional foram feitas pelo modelo de Morton (1983), baseado no conceito de relação complementar de Bouchet (1963).

O conceito de relação complementar entre evapotranspiração potencial e regional pode ser expresso por :

$$\delta ET + \delta ET_p = 0 \quad (1)$$

na qual δET_p é a variação da evapotranspiração potencial e δET a variação na regional causada pela variação na disponibilidade de água no solo. A equação 1 postula que um aumento em ET_p é igual ao decréscimo em ET . Esta equação integrada entre as condições de contorno dos ambientes seco ($ET = 0$ e $ET_p = ET_p'$) e úmido ($ET = ET_p = ET_p''$) leva a :

$$ET + ET_p = ET_p' = 2 ET_p'' \quad (2)$$

A Equação 2 mostra que a evapotranspiração potencial numa área completamente úmida (ET_p'') deveria ser a metade da de uma área completamente seca. Morton (1978, 83) desenvolveu este conceito definindo a evapotranspiração espacial do ambiente úmido ET_w :

$$ET + ET_p = 2 ET_w \quad (3)$$

A Equação 3 possibilita estimativas de evapotranspiração regional ET partir de observações climatológicas de rotina, usadas para computar a potencial ET_p e a regional do ambiente úmido ET_w .

As taxas de evapotranspiração potencial ET_p são obtidas a partir da equação de Kohler e Parmele (1967), desenvolvida a partir da de Penman (1948) com a substituição de γp por λ , visando incluir os efeitos das variações de temperatura na superfície no balanço de radiação de ondas longas :

$$ET_p = D R_w + (1 - D) f_w (v - v_D) \quad (4)$$

na qual R_w a irradiância líquida disponível, f_w o coeficiente de transferência de vapor, v e v_D as pressões de saturação do vapor às temperaturas do ar e do ponto de orvalho, respectivamente, $D = (1 - \lambda/\Delta)^{-1}$, onde Δ é a taxa de variação da pressão de saturação do vapor d'água com a temperatura do ar, λ o coeficiente de transferência de calor, igual a $\gamma p + 4\epsilon\sigma(T + 273)^3 / f_w$, γ constante psicrométrica, p a pressão atmosférica, σ a constante de Stefan-Boltzman, ϵ a emissividade da superfície e T a temperatura do ar.

Pristley & Taylor (1972) propuseram uma equação para estimar a evaporação de uma área com superfície saturada e sem advecção, que se aplica à evaporação de uma superfície líquida grande suficiente para que seja desprezível o efeito das bordas de transição. Neste caso, a evapotranspiração ET'_w , é dada por :

$$ET'_W = 1,26 (1 + \gamma p / \Delta)^{-1} R_W \quad (5)$$

Morton (1983a) propôs alterar a Equação 5, usada no método Adveção-Aridez de Brutsaert & Stricker (1979), para incluir os efeitos das variações de temperatura na superfície nos balanços de ondas longas e nas taxas de variação das pressões de saturação do vapor d'água com a temperatura Δ :

$$ET_W = 14 + 1,2 \Delta_p / (\Delta_p + \gamma p) R_{nTP} \quad (6)$$

onde Δ_p é a tangente à curva de pressão de saturação de vapor d'água com a temperatura de equilíbrio, R_{nTP} a irradiância líquida à temperatura de equilíbrio e 14 e 1,2 são constantes empíricas obtidas por meio de calibração em diversas regiões áridas do mundo onde $ET_P = 2 ET_W$.

As temperaturas de equilíbrio T_P são calculadas iterativamente como :

$$\delta T_P = [R_T / f_W + v_D - v'_p + \lambda (T - T'_P)] / (\Delta'_p - \lambda) \quad (7)$$

na qual $T_P = T'_P + \delta T_P$

As taxas de evapotranspiração potencial ET_P , as irradiâncias líquidas às temperaturas de equilíbrio R_{nTP} e as taxas de evapotranspiração regional do ambiente saturado ET_W são dadas por :

$$ET_P = R_{nT} - \lambda f_W (T_P - T) \quad (8)$$

na qual $f_W = (p_s / \bar{p})^{0,5} 28 / \zeta$

onde o fator de estabilidade $\zeta = \{ 0,28 (1 + v_D / v) + \Delta R_{TC} / [(\gamma p (p_s / \bar{p})^{0,5} 28 (v - v_D))] \}^{-1}$

$$R_{nTP} = ET_P + \gamma p f_W (T_P - T) \quad (9)$$

Finalmente, as estimativas das médias mensais de evapotranspiração regional ET , são dadas em função das equações 8 e 6 por :

$$ET = 2ET_W - ET_P \quad (10)$$

A complexidade do modelo conceitual de relação complementar de Morton é devida principalmente às estimativas de radiação solar global e líquidas, feitas a partir das observações da insolação e estimativas de albedo.

Chiew & Jayasuriya (1990) compararam as estimativas diárias de radiação global e líquidas usando as parametrizações compiladas por Morton com medidas feitas em duas localidades na Austrália, uma com floresta de coníferas e outra com pastagem alta. Apesar do método ter superestimado o albedo da floresta (0,16), usando 0,21, valor típico de pastagem, ele levou a boas estimativas diárias de radiação global e líquida nas duas localidades.

No modelo de Morton (1983) as irradiâncias globais de céu com nebulosidade G são calculadas a partir das irradiâncias no topo da atmosfera G_E , irradiâncias globais de céu claro G_0 e razões de insolação $S = \pi n / 24 \omega$, por:

$$G = S G_0 [0,08 + 0,30 S] (1 - S) G_E \quad (11)$$

na qual G_E e G_0 são obtidos por :

$$G_E = (1354 / \eta^2) (\omega / 180) \cos z \quad (12)$$

na qual $\eta = 1 + (1/60) \sin (29,5i - 106)$, $\cos \omega = 1 - \cos Z / (\cos \varphi \cdot \cos \theta)$, $\cos z = \cos Z + [(180/\pi) \sin \omega / \omega - 1] \cos \varphi \sin \theta$, $\cos Z = \cos (\varphi - \theta)$ e $\theta = -23,2 \sin (29,5 i - 94)$, $i = 1,2, \dots, 12$, onde G_E é a irradiância no topo da atmosfera, η a excentricidade da órbita da Terra em torno do Sol, ω os graus de rotação da Terra entre o nascer e meio dia, z o ângulo zenital médio, Z o ângulo zenital ao meio dia, θ a declinação do Sol e φ a latitude do local.

$$G_0 = G_E \tau [1 + (1 - \tau / \tau_a) (1 + a_0 \tau)] \quad (13)$$

na qual os albedos de céu claro a_0 , as transmitâncias de céu claro τ e suas frações absorvidas τ_a são dadas por :

$$a_0 = 0,11 [\exp 1,08 - (2,16 \cos Z / \pi + \text{sen} Z) \exp (0,012 Z)] / 1,473 (1 - \text{sen} Z) \quad (14)$$

$$\tau = \exp \{ -0,089 [\bar{p} / (p_s \cos z)]^{0,75} - 0,083 (j / \cos z)^{0,90} - 0,0288 (W / \cos z)^{0,60} \} \quad (15)$$

$$\tau_a = \exp [- 0,0415 (j / \cos z)^{0,90} - (0,0029)^{0,5} (W / \cos z)^{0,3}] \quad (16)$$

onde as quantidades de água precipitável W e os coeficientes de turbidez j são obtidos por :

$$W = v_D / (0,49 + T / 129) \quad (17)$$

$$j = [0,5 + 2,5 \cos^2 z] \exp [(21 - T) (\bar{p} / p_s - 1)] \quad (18)$$

As irradiâncias líquidas Rn_T são obtidas pela diferença entre as globais absorvidas e as perdas de ondas longas :

$$Rn_T = (1 - a) G - B \quad (19)$$

na qual os albedos médios com nebulosidade e as perdas de onda longa B são obtidos por :

$$a = a_0 [S + (1 - S) (1 - Z / 330)] \quad (20)$$

$$B = \epsilon \sigma (T + 273)^4 [1 - (0,71 + 0,007 v_D \bar{p} / p_s (1 + \rho))] \quad (21)$$

onde os incrementos na radiação atmosférica devido às nuvens ρ são dados por :

$$\rho = 0,18 \{ [1 - 10 (v_D / v - S - 0,42)] (1 - S)^2 + 10 (v_D / v - S - 0,42) (1 - S)^{0,5} \} p_s / \bar{p} \quad (22)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As séries temporais (1976-97) das médias mensais de evapotranspiração potencial e regional em Presidente Prudente, calculadas usando o conceito de relação complementar pelo modelo de Morton (1983), são mostradas na Figura 2. No período, as médias de evapotranspiração potencial variaram de 77 a 290 mm/mês e as regionais de 4 a 147 mm/mês e apresentaram, respectivamente, leve tendência linear de aumento e decréscimo.

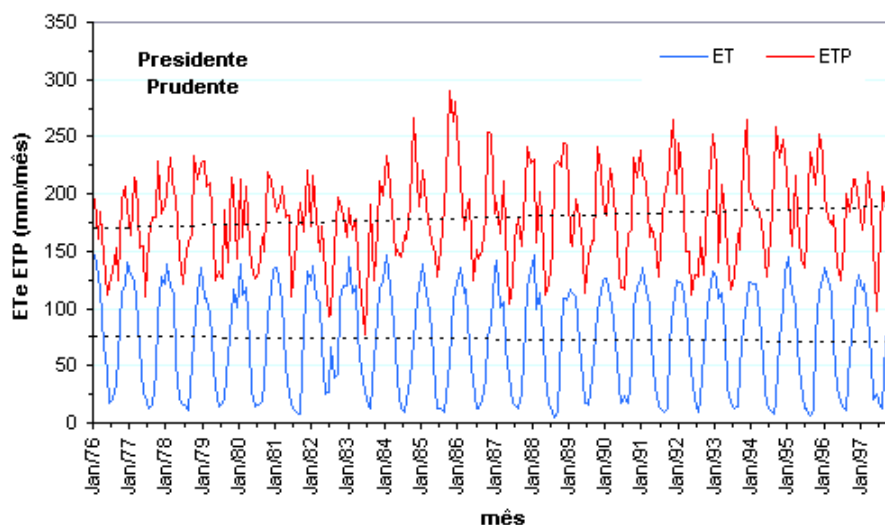


Figura 2. Série temporal dos totais mensais de evapotranspiração potencial (ETP) e regional (ET) e suas tendências lineares em Presidente Prudente, SP.

As médias mensais (1976-97) das irradiâncias globais no topo da atmosfera (G_E) e na superfície (G), albedos (a), perdas de onda longa (B), razões de insolação (S), irradiâncias líquidas (Rn_p), coeficientes de transferência de vapor d'água (f_w) e calor sensível (λ), além das taxas médias diárias de evapotranspiração potencial (ET_p) e regional (ET_r) se encontram na tabela 1. Estas taxas potenciais e regionais variaram, respectivamente, de 6,7 e 4,1 mm/dia em dezembro a 4,0 e 0,6 mm/dia em junho e as taxas regionais corresponderam a 61% das potenciais em dezembro e 15% em junho.

Tabela 1 - Médias mensais (1976-97) das irradiâncias globais no topo da atmosfera (G_E) e na superfície (G), albedos (a), perdas de onda longa (B), razões de insolação (S), irradiâncias líquidas (Rn_p), coeficientes de transferência de vapor d'água (f_w) e calor sensível (λ), e taxas médias diárias de evapotranspiração potencial (ET_p) e regional (ET_r), pelo modelo de Morton (1983), para Presidente Prudente, SP.

mês	G_E W/m ²	G W/m ²	a -	B W/m ²	S -	Rn_T W/m ²	f_w Wm ⁻² mb ⁻¹	λ mb ^o C ⁻¹	ET_p mm/d	ET mm/d
jan	483	217	0,17	37	0,51	143	28,7	0,82	6,5	4,3
fev	460	217	0,17	40	0,53	139	28,7	0,82	6,6	4,1
mar	412	210	0,19	46	0,60	125	28,7	0,82	6,2	3,5
abr	349	191	0,20	55	0,67	97	28,7	0,82	5,6	2,2
mai	293	152	0,21	58	0,63	62	28,7	0,81	4,4	1,1
jun	265	141	0,22	63	0,64	48	27,3	0,82	4,0	0,6
jul	275	158	0,22	68	0,71	55	26,6	0,82	4,7	0,5
ago	319	173	0,21	67	0,63	70	27,4	0,82	5,8	0,5
set	380	176	0,19	55	0,50	87	28,7	0,81	5,9	1,3
out	435	221	0,18	55	0,58	126	28,7	0,82	7,1	2,8
nov	471	238	0,17	50	0,58	147	28,7	0,82	7,8	3,8
dez	487	217	0,17	39	0,50	141	28,7	0,82	7,7	4,1

Na tabela 2 são apresentados os resultados dos totais médios mensais de precipitação, evapotranspiração potencial, calculada pelos métodos de Penman ET_{PEN} e de Morton ET_p , e evapotranspiração regional. As taxas regionais médias anuais corresponderam a 40% das potenciais, 51% no período chuvoso (set-mar) e 20% no seco (abr-ago).

Na figura 2 é mostrada a relação entre os totais mensais de evapotranspiração potencial (ETP) e regional (ET), obtidos pelo modelo de Morton. Verifica-se que em nenhum mês, as taxas regionais foram iguais às potenciais, além de uma tendência de decréscimo nas taxas regionais com o aumento das potenciais.

As relações entre as taxas mensais de evapotranspiração potencial (ET_p) e de ambiente úmido (ET_w), calculadas pelos métodos de Morton e de Penman (ET_{PEN}) são apresentadas na figura 3. As taxas de evapotranspiração do ambiente úmido se aproximaram das obtidas pelo método de Penman. As curvas de ET_w e ET_p são aproximadamente paralelas à ET_{PEN} , a constante de regressão é que varia bastante quando comparadas as ET_p , mostrando que o método de Penman subestimou as taxas potenciais em 58% de Presidente Prudente.

Embora a definição convencional de evapotranspiração potencial de Penman e evapotranspiração do ambiente úmido de Morton sejam relações similares, são duas quantidades distintas (Morton, 1983). As duas estimativas podem convergir quando não há limitações ao suprimento de água no solo. A evapotranspiração do ambiente úmido de Morton depende somente das variáveis atmosféricas e é a evapotranspiração que ocorreria quando não houvesse limitação ao suprimento de água às superfícies solo-planta. É conceitualmente uma representação mais correta do limite superior da evapotranspiração real em relação à de Penman, que depende do suprimento de água do solo.

Tabela 2. Totais médios mensais (1976-97) em mm de precipitação (P), evapotranspiração por Penman (ET_{PEN}), irradiância líquida (Rn_T), evapotranspiração potencial (ET_P) e espacial (ET) obtidos pelo modelo de Morton.

Mes	P	ET_{PEN}	Rn_T	ET_P	ET
jan	193	149	163	203	134
fev	161	136	144	185	116
mar	122	133	142	193	108
abr	81	103	107	169	67
mai	87	75	71	137	34
jun	58	62	53	121	18
jul	37	70	63	144	17
ago	38	91	80	181	17
set	88	107	96	178	40
out	114	143	144	221	87
nov	139	151	162	223	114
dez	165	150	161	208	126
Ano	1284 100%	1369 107%	1384 108%	2162 168%	875 68%

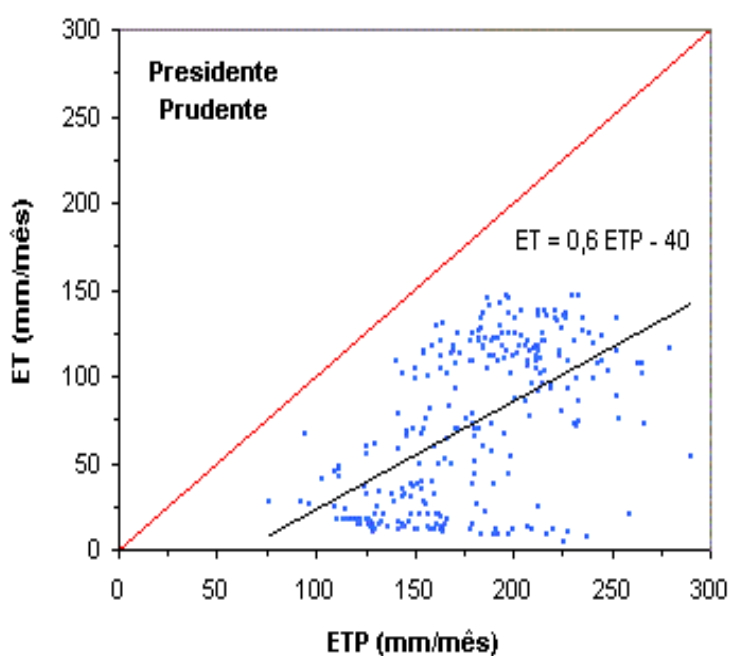


Figura 2. Relações entre os totais mensais de evapotranspiração regional (ET) e potencial (ETP), obtidos pelo modelo de Morton em Presidente Prudente, SP.

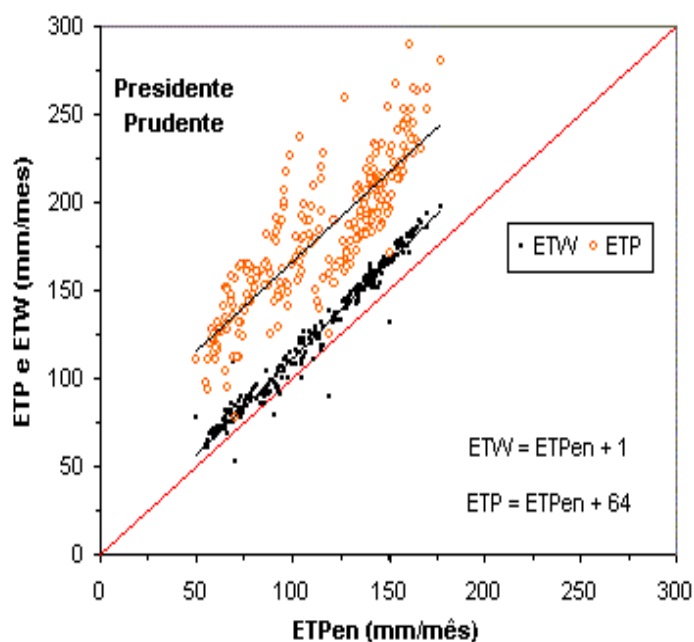


Figura 3. Relações entre as taxas mensais de evapotranspiração potencial (ET_p) e do ambiente úmido (ET_w) obtidos pelos métodos de Morton e de Penman (ET_{Pen}) em Presidente Prudente.

4. CONCLUSÕES

Em Presidente Prudente, SP, as taxas médias mensais de evapotranspiração regional, calculadas pelo modelo de Morton, variaram de 4,3 mm/dia no verão a 0,5 mm/dia no inverno e foram em média 40% inferiores às potenciais.

As taxas de evapotranspiração do ambiente úmido definidas por Morton, se aproximaram das estimativas de evapotranspiração potencial pelo método de Penman, logo ela pode ser usada para representar a potencial convencionalmente definida.

O modelo conceitual de relação complementar de Morton fornece estimativas mais realistas e consistentes, principalmente em regiões mais secas, das taxas de evapotranspiração regional, obtidas a partir de seus efeitos nas observações climatológicas de rotina, usadas para cálculo da evapotranspiração potencial.

5. REFERÊNCIAS

- BOUCHET, R. J. Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique. International Association of Scientific Hydrology, **Proceedings**, Berkeley, CA. Symposium Publication n.62, p. 134-142, 1963.
- BOUCHET, R. J. Modification des facteurs climatiques et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) par l'irrigation. **Journal of Hydraulics**, n.13, p. 1-7, 1974.
- BRUTSAERT, W.; STRICKER, H. An advection-aridity approach to estimate actual evapotranspiration. **Water Resources Research**, v.15, n. 2, p. 443-450, 1979.
- CHIEW, F. H. S.; JAYASURIYA, L. N. N. Applicability of Morton's complementary relationship method of estimating evapotranspiration in rainfall-runoff modelling. Conference on Agricultural Engineering, **Proceedings**, Toowoomba, Austrália. Publication n. 13, p. 289-293, 1990.
- CHIEW, F. H.; McMAHON, T. A. The applicability of Morton's and Penman evapotranspiration estimates in rainfall-runoff modeling. **Water Resources Bulletin** n. 4, p. 611-620, 1991.
- FORTIN, J. P. & SEGUIN, B. Estimation de l'ETR regional à partir de l'ETP locale: utilisation de la relation de Bouchet à différents échelles de temps. **Annales Agronomiques**, v. 26, n. 5, p. 537-554, 1975.

- KIM, C. P.; ENTEKHABI, D. Examination of two methods for estimating regional evaporation using a coupled mixed layer na land surface model. **Water Resources Research**, v. 33, n. 9, p. 2109-2116, 1997.
- KOHLER, M. A.; PARMELE, L. H. Generalized estimates of free-water evaporation, **Water Resources Research**, v. 3, n. 4, p. 996-1005, 1967.
- KOVÁKS, G. Estimation of average areal evapotranspiration proposal to modify Morton's model based on the complementary character of actual and potencial evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v. 95, p. 227-240, 1990.
- LEMEUR, R.; ZHANG, H. Evaluation of three evapotranspiration models in terms of their applicability for an arid region. **Journal of Hydrology**, v. 114, p. 395-411, 1990.
- MARCELINO, B. C. **Estimativas de evapotranspiração regional pelo modelo de Morton e aplicação no cálculo de balanço hídrico, para o Estado de São Paulo**. 129p. (Tese de Doutorado em Agronomia, FCA, UNESP, Botucatu, SP), 1997.
- MARCELINO, C. B. Estimativas de evapotranspiração usando os modelo de Morton e Penman. In : X Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais...** Brasília, [CD-ROM] , 1998.
- MARCELINO, C. B.; LEOPOLDO, P. R. Estimativas operacionais de evapotranspiração regional.. In : X Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais...** Brasília, [CD-ROM] , 1998.
- MATTOS, K. M. C.; MATTOS, A. Determinação da evapotranspiração média real e espacial para utilização em estudos hidrológicos. In : X Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais...** Brasília, [CD-ROM] , 1998.
- MORTON, F. I. Catchment evaporation and potencial evaporation - further development of a climatologic relationships. **Journal of Hydrology**, v.12 , p. 81-99, 1971.
- MORTON, F. I. Estimating evaporation and transpiration from climatological observations. **Journal of Applied Meteorology**, v.14, p. 488- 497, 1975.
- MORTON, F. I. Estimating evapotranspiration from potential evaporation: Practicality of an iconoclastic approach. **Journal of Hydrology**, v. 38, p. 1-32, 1978.
- MORTON, F. I. Operational estimates of areal evaporation and their significance to the science and practice of hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 66, p. 1-76, 1983.
- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Royal Meteorological Society. **Proceedings**, London, ser A, v.193, p. 120-145, 1948.
- PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, v. 100, p. 81- 92 , 1972.
- ROQUE, R. O. **Estimativas de evapotranspiração espacial e evaporação de lagos no Pontal do Paranapanema pelo modelo conceitual de relação complementar de Morton**. 63 p. (Dissertação de Mestrado em Meteorologia , INPE, São José Campos SP), 2000.
- SEGUIN, B. Influence de l'evapotranspiration régionale sur la mesure locale d'evaporatranspiration potentielle. **Agricultural Meteorology**, v.15, p.355-370, 1975.
- THOM, A. S.; OLIVER, H. R. On Penman's equation for estimating regional evaporation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.103, p. 345-357, 1977.