

# **OBTENÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM ESCALA REGIONAL COM O USO DA EQUAÇÃO DE PENMAN-MONTEITH**

**ANTÔNIO HERIBERTO DE CASTRO TEIXEIRA<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Eng. Agrônomo, Pesquisador. Depto. de Agrometeorologia, Embrapa Semi-Árido, Petrolina-PE,  
Fone (0xx87)38621711, heribert@cpatsa.embrapa.br

Apresentado no XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 22 a 25 de Setembro de 2009 – GrandDarrell Minas Hotel, Eventos e Convenções – Belo Horizonte – MG.

**RESUMO:** Há um crescente interesse na quantificação da evapotranspiração (ET) em escala regional e o sensoriamento remoto pode ser usado para isto em diferentes escalas. Este trabalho apresenta um algoritmo baseado na equação de Penman-Monteith para a regionalização da ET através de modelagens dos parâmetros dos balanços de energia, das resistências ao fluxo de vapor d'água e de variáveis climáticas. A eficiência do algoritmo foi comprovada com a obtenção precisa da ET para os períodos seco e chuvoso na região semi-árida do Submédio São Francisco, podendo agora ser usado para estudos do impacto da expansão da agricultura irrigada sobre a vegetação natural e para quantificar a produtividade da água em áreas envolvendo estes ecossistemas.

**PALAVRAS CHAVES:** saldo de radiação, fluxo de calor latente, sensoriamento remoto.

## **REGIONAL EVAPOTRANSPIRATION ACQUIREMENT BY USING THE PENMAN-MONTEITH EQUATION**

**ABSTRACT:** There is a growing interest in quantifying regional scale evapotranspiration (ET) and remote sensing measurements can be used for this at different spatial scales. This work presents an algorithm based on Penman-Monteith equation for the ET regionalization by modelling the energy balance parameters, water vapour flux resistances and climatic variables. The efficiency of the algorithm was demonstrated by the accurate acquirement of ET for the dry and wet periods in the semi-arid of the Low-Middle São Francisco and can now be used to study the impact of expanding irrigated agriculture over the natural vegetation and to quantify water productivity in areas involving these two ecosystems.

**KEYWORDS:** net radiation, latent heat flux, remote sensing

**INTRODUÇÃO:** A intensificação da agricultura irrigada tem causado grandes mudanças de cobertura da terra durante as últimas décadas no Submédio São Francisco, onde a escassez da água em algumas áreas e em certos períodos do ano tem causado alguns problemas. Por outro lado, a drenagem de produtos agrícolas pode afetar a qualidade da água. Com a redução da quantidade de água de boa qualidade, conflitos entre os usuários tendem a aumentar.

A medição precisa da ET reduz significativamente as incertezas no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica (Cleugh et al., 2007). Medições ao nível de campo foram

realizadas em culturas irrigadas e em vegetação natural na região semi-árida da bacia do Rio São Francisco (Teixeira et al., 2007, Teixeira et al., 2008a,b), porém dados de torres de fluxos são apenas uma primeira estimativa da ET em uma região envolvendo ecossistemas diferenciados. De acordo com Nagler et al. (2007), índices vegetativos obtidos remotamente em conjunto com dados micrometeorológicos podem ser usados para extrapolar os valores pontuais da ET para áreas mais largas.

Este trabalho combina dados do satélite Landsat, experimentos de campo e estações agrometeorológicas para a elaboração de um algoritmo baseado na equação de Penman-Monteith. A modelagem envolveu equações dos balanços de radiação e energia, as resistências ao fluxo de vapor d'água e a interpolação de parâmetros climáticos na região semi-árida do Submédio São Francisco.

**MATERIAL E MÉTODOS:** Para elaboração do algoritmo foram usados medições e estimativas do saldo de radiação ( $R_n$ ), do fluxo de calor no solo ( $G$ ) e das resistências aerodinâmica ( $r_a$ ) e da superfície ( $r_s$ ) ao fluxo de vapor d'água através de modelagem. Uma imagem Landsat 7 e nove imagens Landsat 5 envolveram um período de setembro de 2001 a janeiro de 2007 e os cálculos foram realizados em conjunto com sete estações agrometeorológicas. Nas imagens Landsat, o albedo planetário ( $\alpha_p$ ) foi calculado através das radiações espectrais de cada banda, seguido de expressões matemáticas para a integração. As bandas 1 a 5 e 7 fornecem os dados para as bandas do visível e infravermelho para este cálculo. A radiação espectral da banda 6 foi convertida em uma temperatura radiométrica aplicável ao topo da atmosfera ( $T_{sat}$ ) pela inversão da lei de Plank na faixa de comprimento de onda 10,4 – 12,5  $\mu\text{m}$ . Tanto para  $\alpha_p$  como para  $T_{sat}$  foram aplicadas correções atmosféricas através de equações de regressão para obtenção dos valores na superfície da Terra utilizando-se dados de campo.

A radiação de ondas longas incidente ( $R_{L\downarrow}$ ) foi calculada usando a equação de Stefan-Boltzmann com emissividade da atmosfera ( $\epsilon_a$ ) determinada através da sua relação com a transmissividade atmosférica para ondas curtas ( $\tau_{sw}$ ) e com grades de temperatura do ar ( $T_a$ ). A radiação de ondas longas emitida pela superfície ( $R_{L\uparrow}$ ) foi obtida usando a lei de Stefan-Boltzmann com a emissividade da superfície ( $\epsilon_0$ ) determinada através da sua relação com o NDVI e usando-se a temperatura da superfície ( $T_0$ ). Esta última foi adquirida de  $T_{sat}$  após a correção atmosférica.  $R_n$  foi então obtido pelo balanço de radiação envolvendo ondas curtas e longas.  $G$  em escala regional foi calculado através de sua relação com  $R_n$ , e a correlação dessa relação com os valores medidos em campo do albedo da superfície ( $\alpha_0$ ), obtido de  $\alpha_0$  após as correções atmosféricas.

As coordenadas e os detalhes de cada experimento equipado com torre de fluxos usado na geração do algoritmo são descritos na Tabela 1 (Teixeira et al. 2007, 2008a,b). Os métodos usados foram o da razão de Bowen (BR) e das correlações turbulentas (CT).

**Tabela 1:** Experimentos de balanço de energia usados para geração do algoritmo baseado na equação de Penman-Monteith na região semi-árida do Submédio São Francisco.

Vegetação	Localização (latitude, longitude)	Área (ha)	Sistema de Irrigação	Método
Uva para vinho	9°16' 01.73" S; 40°11' 32.62"O	4,13	Gotejamento	BR
Uva para mesa	9°18' 40.84" S; 40°22' 29.47"O	5,13	Micro-aspersão	BR
Mangueira	9°22' 32.20" S; 40°33' 54.23"O	11,92	Micro-aspersão	CT
Caatinga	9°03' 30.71" S; 40°19' 45.21"O	N/A	Não irrigada	CT

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** A Tabela 2 apresenta os modelos usados para a obtenção da ET em escala regional pela equação de Penman-Monteith.

**Tabela 2:** Resumo das análises de regressões instantâneas: albedo da superfície -  $\alpha_0$ ; albedo planetário -  $\alpha_p$ ; temperatura da superfície -  $T_0$ ; temperatura por satélite -  $T_{sat}$ ; emissividade atmosférica -  $\epsilon_a$ , transmissividade atmosférica -  $\tau_{sw}$ ; emissividade da superfície -  $\epsilon_0$ , comprimento de rugosidade para transferência de momentum -  $z_{0m}$ , fluxo de calor no solo -  $G$ ; saldo de radiação -  $R_n$ ; resistência aerodinâmica -  $r_a$  e resistência da superfície -  $r_s$ .

Variável	Equação	a	b	R <sup>2</sup>
$\alpha_0$	$\alpha_0 = a \alpha_p + b$	0,70	0,06	0,96
$T_0$	$T_0 = a T_{sat} + b$	1,11	-31,89	0,95
$\epsilon_a$	$\epsilon_a = a (-\ln \tau_{sw})^b$	0,94	0,10	0,75
$\epsilon_0$	$\epsilon_0 = a \ln NDVI + b$	0,06	1,00	0,90
$G/R_n$	$G/R_n = a \exp(b\alpha_0)$	3,98	-25,47	0,90
$z_{0m}$	$z_{0m} = \exp [(aNDVI/\alpha_0) + b]$	0,24	-2,12	0,92
$r_a$	$r_a = a z_{0h}^{-1} + b$	0,22	30,1	0,74
$r_s$	$r_s = \exp[a(T_0/\alpha_0)(1 - NDVI) + b]$	0,03	3,13	0,81

A atmosfera interfere no sinal que chega ao sensor do satélite. Parte de  $R_G$  é dispersa de volta antes de chegar à superfície terrestre, sendo então necessária uma correção em  $\alpha_p$  para obtenção de  $\alpha_0$ . Para esta correção, uma relação linear foi aplicada para a correção atmosférica (Tabela 2).

Além das diferenças entre as temperaturas radiométricas -  $T_{sat}$  e aerodinâmicas -  $T_0$  (Troufleau et al., 1997), parte da radiação termal da superfície terrestre é absorvida pela atmosfera e emitida na direção do satélite, necessitando. Para corrigir este efeito conjugado a equação de regressão da Tabela 2 foi aplicada.

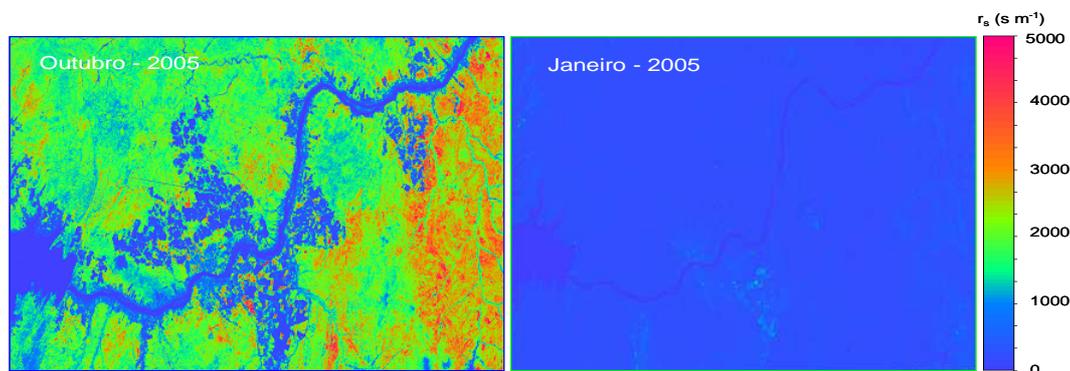
As medições de  $R_{L\downarrow}$  sobre a caatinga em combinação com  $T_a$  permitiram a determinação de  $\epsilon_a$  e então a correlação com  $\tau_{sw}$ . Os valores de  $\epsilon_a$  foram usados juntamente com a grade de  $T_a$  na determinação de  $R_{L\downarrow}$  em escala regional. Os valores de campo de  $R_{L\uparrow}$  e de  $T_0$  permitiram a determinação de  $\epsilon_0$ . Seguindo Van der Griend and Owe (1993), os resultados deste último parâmetro foram correlacionados com os valores de NDVI (Tabela 2), e usados no cálculo de  $R_{L\uparrow}$ . Com os valores todos os componentes de ondas curtas e longas determinados em escala regional determinados,  $R_n$  nesta escala foi obtido.

Medições de campo de  $G$  e  $R_n$  foram usadas em conjunto com medições por satélites de  $\alpha_0$  para a obtenção da equação descrita na Tabela 2. Com os valores de  $G/R_n$  e de  $R_n$ , os valores de  $G$  foram obtidos em escala regional.

Valores de  $z_{0m}$  foram determinados nos experimentos da Tabela 1. Para a estimativa dos valores regionais Allen et al. (2007a) sugeriram a expressão simplificada baseada em  $\alpha_0$  e no NDVI descrita na Tabela 2. A força de dragagem entre as superfícies e a atmosfera na equação de Penman-Monteith é representada por  $r_a$ , e esta resistência depende do comprimento de rugosidade que governa a transferência de calor e vapor da superfície para a atmosfera ( $z_{0h}$ ). No atual estudo, este último parâmetro foi considerado como sendo 10% de  $z_{0m}$  (Teixeira et al., 2008b) e então o modelo de  $r_a$  baseado em  $z_{0h}$  da Tabela 2 foi gerado. Embora que não haja relações específicas das características das superfícies com  $z_{0h}$ , de acordo com Cleugh et al. (2007) a equação de Penman-Monteith é relativamente insensível às alterações em  $r_a$  o que pode ser explicado pela sua presença tanto no numerador como no denominador da equação.

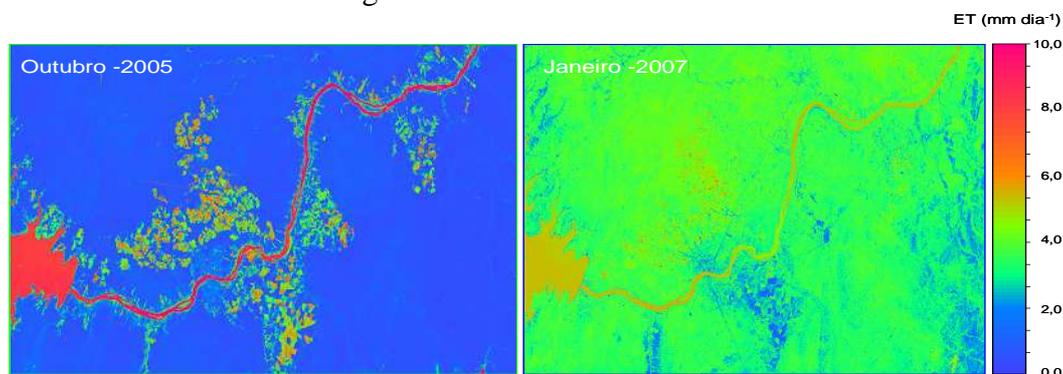
Os parâmetros de resistência na equação de Penman-Monteith são combinados em um único,  $r_s$ , que opera em série com  $r_a$ . Os valores de  $r_s$  foram determinados em campo invertendo-se a equação de Penman-Monteith (Teixeira et al., 2008b), e então

correlacionados com a  $T_0$ ,  $\alpha_0$  e NDVI obtidos por sensoriamento remoto (Tabela 2), para aplicação em escala regional. A Figura 1 apresenta os valores de  $r_s$  para os períodos seco (Outubro) e chuvoso (Janeiro) na região de estudo.



**Figura 1.** Resistências da superfície ( $r_s$ ) no momento da passagem do Landsat para o período seco (Outubro de 2005) e para o período chuvoso (Janeiro de 2007) em Petrolina-PE, Brasil.

Percebe-se claramente uma redução dos valores de  $r_s$  com uma maior uniformidade em janeiro, dentro da estação chuvosa, resultante de uma maior distribuição da umidade do solo, o que mostra coerência no modelo de determinação da  $r_s$ . Com os valores de  $r_a$  e  $r_s$  determinados e com as grades de parâmetros climáticos das sete estações agrometeorológicas, a equação de Penman-Monteith foi aplicada para a obtenção dos valores regionais instantâneos da ET. Na extrapolação para valores diários utilizou-se a razão instantânea  $ET/ET_0$  e os valores diários de  $ET_0$ , já que foi observada uma diferença de apenas 1% nos valores instantâneos e diários daquela razão. A Figura 3 apresenta os resultados para os períodos seco e chuvoso na região de estudo.



**Figura 3.** Evapotranspiração diária para o período seco (Outubro de 2005) e para o período chuvoso (Janeiro de 2007) em Petrolina-PE, Brasil.

Durante a época seca, a caatinga converte a maior parte da energia disponível em calor sensível ( $H$ ), enquanto as culturas irrigadas apresentam altos valores de ET (Figura 3a). Em geral, a irrigação é diária, reduzindo  $H$  nas culturas irrigadas. No período chuvoso, as taxas evapotranspiratórias da caatinga são em alguns casos, semelhantes as das culturas irrigadas, sendo uma grande parte da energia disponível convertida em  $\lambda E$  (Figura 3b). Tomando-se os dois períodos e comparando-se os resultados do algoritmo com as medições de campo em mangueira irrigada e caatinga, as estimativas foram bastante satisfatórias apresentando um RMSE de  $27,6 \text{ W m}^{-2}$  para os valores instantâneos de  $\lambda E$ , sendo os medidos 90% dos estimados.

**CONCLUSÕES:** Experimentos de balanço de energia em vegetação natural e em culturas irrigadas foram usados em conjunto com imagens do satélite Landsat para

elaboração de um algoritmo para determinação da evapotranspiração em escala regional baseado na equação de Penman-Monteith. Os coeficientes de determinação das equações utilizadas na elaboração do algoritmo variaram de 0,74 a 0,96. Os valores mais baixos foram para a resistência aerodinâmica, a qual não apresenta grandes erros na equação de Penman-Monteith devido à presença no numerador e no denominador; e para a emissividade atmosférica, a qual é reconhecida como um dos parâmetros mais difíceis para modelagem. O algoritmo baseado na equação de Penman-Monteith se apresenta muito útil quando se há disponibilidade de uma rede de estações agrometeorológicas para espacialização das variáveis hídricas.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:**

ALLEN, R.G., TASUMI, M., TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineer ASCE**, Newark, v. 133, 380-394, 2007.

CLEUGH, H.A., LEUNING, R., MU, Q., RUNNING, S.W. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 106, p. 285-304, 2007.

NAGLER, P.L., JETTON, A., FLEMING, J., DIDAN, K., GLENN, E., ERKER, J., MORINO, K., MILLIKEN, J., GLOSS, S. Evapotranspiration in a cottonwood (*Populus fremontii*) restoration plantation estimated by sap flow and remote sensing methods. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 144, p. 95- 110, 2007.

TEIXEIRA, A. H. de C.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; BASSOI, L. H. Crop water parameters of irrigated wine and table grapes to support water productivity analysis in Sao Francisco River basin, Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 94, p. 31-42, 2007.

TEIXEIRA, A.H. DE C., W.G.M., BASTIAANSSEN, MOURA, M. S. B., SOARES, J. M., AHMAD, M-UD-D, BOS, M. G. Energy and Water Balance Measurements for Water Productivity Analysis in Irrigated Mango Trees, Northeast Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, p. 1524-1537, 2008a.

TEIXEIRA, A.H. DE C. BASTIAANSSEN, W.G.M., AHMAD, M.D., MOURA, M.S.B., BOS, M.G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil, **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 362, p. 110-127, 2008b.

TROUFLEAU, D., LHOMME, J.-P., MONTENY, B., VIDAL, A. Sensible heat flux and radiometric surface temperature over sparse sahelian vegetation: is the  $k_B^{-1}$  a relevant parameter? **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 189, p. 815–838, 1997.

VAN DER GRIEND, A.A., OWE, M.. Determination of microwave vegetation optical depth and single scattering albedo from large scale moisture and Nimbus/SMMR satellite observations. **International Journal of Remote Sensing**, Londres, v. 14, n. 10, p. 1975-1996, 1993.