



## **XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE**

### **COMPARAÇÃO DA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ( $E_{T_0}$ ) ENTRE O ALGORITMO SEBAL E O MÉTODO PADRÃO DE PENMAN-MONTEITH FAO-56**

*Rafaella C. M. Matos<sup>1</sup>; José Roberto G. Azevedo<sup>2</sup> & Ana Lúcia B. Candeiras<sup>3</sup>*

**RESUMO** – A evapotranspiração é responsável por conectar energia, clima e hidrologia sendo a segunda maior componente do ciclo hidrológico e muito estudada ao redor do mundo, estimar esta variável é importante para gerenciamento de recursos hídricos quando se trata de energia hidroelétrica, abastecimento de água potável, irrigação e pesca, mas pesquisas sobre este fator também são relacionadas aos problemas ambientais e sua contribuição para mudanças climáticas globais. A partir da aplicação do algoritmo SEBAL em 13 imagens do sensor TM-Landsat obtidas entre os anos de 2003 e 2010 na área do entorno do reservatório de Itaparica, localizado no semi-árido pernambucano, o presente trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho deste algoritmo para estimativa da evapotranspiração de referência em relação à equação padrão de Penman-Monteith FAO 56, através de análises estatísticas dos dados. Este método não se mostrou satisfatório, com índice de desempenho de 0,19, o que é um desempenho péssimo de acordo com Camargo e Sentelhas (1997).

**ABSTRACT**– Evapotranspiration is responsible for the connection between energy, climate and hydrology, being the second most important component of the hydrological cycle and one of the most studied variables around the World. Its estimation is very important in hydric resources management for hydroelectrical energy, water supply, irrigation and fishing. However researches about this theme are also related to environmental problems and its contribution for global climate changes. With the use of SEBAL algorithm in 13 images from TM-Landsat sensor obtained between the years of 2003 and 2010 in the area around Itaparica's reservoir, in Pernambuco's semiarid area, the objective in

1) Doutoranda na Universidade Federal de Pernambuco, rafaella.matos@gmail.com

2) Professor associado da Universidade Federal de Pernambuco, robdosport@hotmail.com

3) Professora adjunta da Universidade Federal de Pernambuco, analucia@ufpe.br

this paper was to assess the performance of this algorithm for reference evapotranspiration estimation in relation to Penman-Monteith FAO 56 equation. This method was not ideal, its performance index was 0.19, which is a poor performance according to Camargo and Sentelhas (1997).

**Palavras-Chave** – Evapotranspiração, SEBAL, Penman-Monteith.

## INTRODUÇÃO

A evapotranspiração (ET) é responsável por conectar energia, clima e a hidrologia (Braun *et. al.*, 2001), sendo a segunda maior componente do ciclo hidrológico e muito estudada ao redor do mundo (Ramírez-Builes e Harmsen, 2011).

Existem hoje diversos métodos para obtenção de ET, métodos diretos através do uso de lisímetros e balanço hídrico do solo, ou indiretos como os métodos de Thornthwaite, Hargreaves-Samani, Jensen e Haise, entre outros, para a aplicação destes métodos indiretos é necessário dispor de uma rede de monitoramento de dados meteorológicos, no entanto, embora o Brasil seja coberto por duas grandes redes de monitoramento como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e o Centro de Previsão e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), muitas regiões ainda não são cobertas pelas mesmas, levando à estimativa da ET a partir de poucos parâmetros meteorológicos por vezes limitando o uso do método padrão de Penman-Monteith.

Sensores a bordo de satélites fornecem medidas das características da superfície terrestre de forma calibrada (com acurácia e precisão conhecidas) e consistente permitindo que estudos sejam realizados para detecção e quantificação de mudanças no ambiente terrestre, dependendo do sensor (Chander *et. al.*, 2009).

O *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), desenvolvido por Bastiaanssen (1995), é um modelo baseado em imagens de satélites que tem sido amplamente utilizado para obtenção de resultados importantes para grandes áreas, tais como valores de saldo de radiação, fluxo de calor no solo e ET auxiliando assim no gerenciamento e monitoramento de recursos naturais.

A partir da aplicação do algoritmo SEBAL em 13 imagens de satélite obtidas entre os anos de 2003 e 2010 na área do entorno do reservatório de Itaparica, localizado no semi-árido pernambucano, o presente trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho deste algoritmo para estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) em relação à equação padrão de Penman-Monteith parametrizada pelo Boletim nº 56 da FAO, através de análises estatísticas dos dados.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de estudo

Sob as coordenadas 38°19' de longitude Oeste e 9°6' de latitude Sul, o reservatório de Itaparica (figura 1) é segundo maior reservatório da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), integrando o complexo hidrelétrico de Paulo Afonso. Está localizado na “Depressão do São Francisco” com clima semi-árido quente e seco BShw, segundo a classificação climática de Köppen e vegetação do tipo hiperxerófila arbórea, densa no topo das chapadas e arbórea aberta nos níveis inferiores.

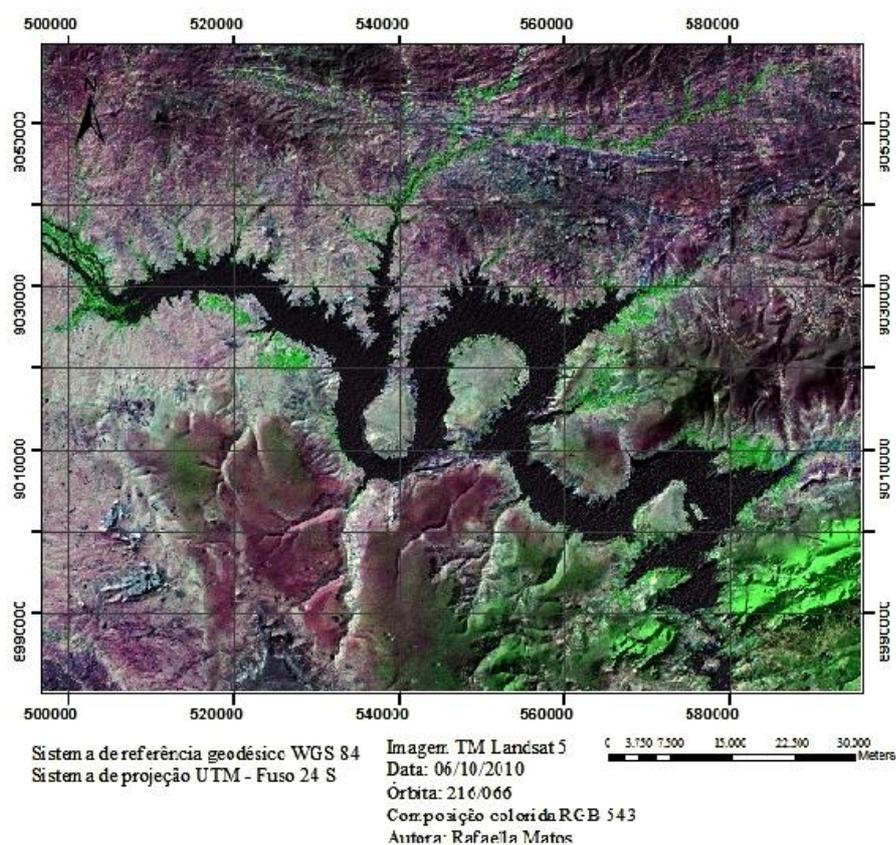


Figura 1 – Reservatório de Itaparica e entorno.

O entorno do reservatório consiste de uma região predominantemente rural, com a existência de vários projetos de irrigação e uso da água em grande parte aplicada à agricultura irrigada e uso crescente das áreas rasas para implantação de projetos de aquicultura (Sobral et. al., 2006).

### Aquisição dos dados

Foram obtidas 13 imagens do sensor Thematic Mapper (TM) a bordo do satélite Landsat 5 a partir do site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), referentes às datas: 31 de Julho de 2003, 06 e 22 de Dezembro de 2003, 08 e 24 de Dezembro de 2004, 24 de Outubro de 2005, 12

de Novembro de 2006, 05 de Abril de 2007, 14 de Setembro de 2008, 01 de Novembro de 2008, 04 e 20 de Novembro de 2009, 06 de Outubro de 2010.

Também foram obtidos dados diários da estação meteorológica do município de Floresta que se encontra sob as coordenadas  $-8,60^\circ$  de latitude e  $-38,57^\circ$  de longitude, as informações relevantes ao cálculo da ETo através do método de Penman-Monteith foram obtidas para as mesmas datas das imagens sob as quais foi aplicado o algoritmo SEBAL.

Estas informações se encontram disponíveis no Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA) no site do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do INPE.

### Pré-processamento

Nesta primeira etapa as 13 imagens foram calibradas radiometricamente de acordo com a equação apresentada em Markham e Baker (1987) que transforma o número digital (ND) de cada pixel em radiância espectral, após esse procedimento foi então calculada a reflectância monocromática de cada banda do sensor a partir da equação presente em Bastiaanssen (1995).

### Balço de energia

A ETo consiste na razão entre o fluxo de calor latente (LE) e o calor latente de vaporização da água, que é a diferença entre o saldo de radiação (Rn) e o fluxo de calor no solo (G), sendo que LE consiste no fluxo de massa na atmosfera oriundo da evaporação mais a transpiração das plantas da área, ao mesmo tempo em que representa a taxa de calor cedido à água da superfície para que a mesma evapotranspire. Com o conhecimento do fluxo de calor no solo, sensível e o saldo de radiação, o LE pode ser calculado de acordo com a equação 1:

$$LE = R_n - G - H \quad (1)$$

Onde H é o fluxo de calor sensível ( $Wm^{-2}$ ).

O cálculo do saldo de radiação à superfície Rn ( $Wm^{-2}$ ) foi realizado a partir da equação do balanço de radiação à superfície, apresentado na equação 2:

$$R_n = R_{sol,inc} (1 - \alpha_{sup}) - R_{ol,emi} + R_{ol,atm} - (1 - \epsilon_0) R_{ol,atm} \quad (2)$$

Onde:

$R_{sol,inc}$  é a radiação de onda curta incidente ( $Wm^{-2}$ );

$\alpha_{sup}$  é o albedo de superfície (adimensional);

$R_{ol,emi}$  é a radiação de onda longa emitida ( $Wm^{-2}$ );

$R_{ol,am}$  é a radiação de onda longa incidente ( $Wm^{-2}$ ); e

$\varepsilon_0$  é a emissividade de cada pixel no domínio da banda larga.

O fluxo de calor no solo (G) foi obtido de acordo com a equação 3 proposta por Bastiaanssen (2000):

$$G = \left[ \frac{T_s}{\alpha} \left( 0,0038\alpha_{sup} + 0,0074\alpha_{sup}^2 \right) (1 - NDVI^4) \right] Rn \quad (3)$$

Onde:

$T_s$  é a temperatura da superfície ( $^{\circ}C$ );

NDVI é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada calculada pixel a pixel.

O Fluxo de Calor Sensível (H) é a chave do SEBAL e a etapa mais complexa, sua estimativa é realizada com base na velocidade do vento e temperatura da superfície, no entanto, segundo Bastiaanssen et. al. (1998) é necessário utilizar uma calibração interna da diferença de temperatura entre os dois níveis da superfície, a equação 4 consiste no cálculo do H:

$$H = \rho c_p \frac{(a + bT_s)}{r_{ah}} \quad (4)$$

Onde:

$\rho$  é a massa específica do ar ( $1,5 \text{ kg/m}^3$ );

$c_p$  é o calor específico do ar ( $1004 \text{ J/kg K}$ );

$a$  e  $b$  são constantes de calibração da diferença da temperatura entre dois níveis ( $Z_1$  e  $Z_2$ );

$T_s$  é a temperatura da superfície ( $^{\circ}C$ ); e

$r_{ah}$  é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (s/m).

Para o cálculo de H são necessários dados de uma estação meteorológica que esteja no interior da cena, tais dados consistem em velocidade do vento (m/s) ao nível Z (m) e a altura média da vegetação (m) ao redor do local da medição da velocidade do vento, estas informações foram obtidas a partir dos dados disponíveis no site do CPTEC/INPE para a estação de Floresta já mencionada.

Também é preciso conhecer dois pixels, denominados pixels âncoras, ou pixels quente e frio, ou seja com o maior e o menor valor de temperatura dentro da cena estudada, para determinar a variação da temperatura (dT) e a resistência aerodinâmica para todos os pixels.

### Penman-Monteith FAO 56

O método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO é atualmente considerado o método padrão para cálculo da ETo, para realizar este cálculo, uma série de variáveis são necessárias como dados de entrada, tais como temperatura do ar máxima e mínima (°C), velocidade do vento (m/s), umidade relativa do ar (%), insolação total (horas), latitude, altitude e dia juliano.

Por muitas vezes uma ou mais variáveis não estão disponíveis sendo necessário estimá-las através de metodologias propostas por Allen et. al. (1998) e apresentadas no boletim 56 da FAO, para calcular a ETo, utiliza-se a equação 5 a seguir:

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta(R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{(T_{med} + 273)} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (5)$$

Onde:

ETo é a evapotranspiração de referência (mm.dia);

$\Delta$  é a declividade da curva de pressão de vapor na saturação (KPa/°C);

Rn é a radiação líquida (MJ/m<sup>2</sup>/dia);

G é o fluxo do calor no solo (MJ/m<sup>2</sup>/dia);

$\gamma$  é a constante psicométrica (KPa/°C);

Tmed é a temperatura média do ar (°C);

U<sub>2</sub> é a velocidade do vento a 2 m de altura;

e<sub>s</sub> é a pressão de vapor na saturação (KPa); e

e<sub>a</sub> é a pressão de vapor atual (KPa).

Os valores de  $\Delta$ ,  $\gamma$ , e<sub>s</sub> e e<sub>a</sub> necessitam serem calculados, já que por muitas vezes Rn, G, U<sub>2</sub> e T são medidos na estação meteorológica.

### Análise dos resultados

A análise dos resultados teve como base a regressão com coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) da regressão linear entre a ETo calculada a partir das equações empíricas e o método de Penman-Monteith.

Através do índice de concordância (d) de Willmott (Willmott et. al., 1981), foi verificada a exatidão das estimativas, este coeficiente pode ser calculado a partir da equação 6:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \quad (6)$$

Onde:

O<sub>i</sub> são valores calculados a partir do método padrão;

P<sub>i</sub> são valores calculados pelos métodos citados anteriormente;

O é a média dos valores estimados pelo método padrão;

N é o número de eventos.

Este índice varia entre 0 e 1, sendo que 1 representa uma concordância perfeita entre os valores medidos e estimados e 0 representa a não concordância entre os mesmos.

A correlação (r) mede a intensidade da relação entre os valores medidos e estimados é dada a partir da equação 7 a seguir:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{N - 1}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(y_i - \bar{y})^2}{N - 1}}} \quad (7)$$

Detalhes sobre a análise da correlação podem ser observados na tabela 1.

Tabela 1 – Valores de correlação

r	Correlação
0,00 – 0,19	Bem fraca
0,20 – 0,39	Fraca
0,40 – 0,69	Moderada
0,70 – 0,89	Forte
0,90 – 1,00	Muito Forte

Apresentado por Camargo e Centelhas (1997) o coeficiente de desempenho (c) como o próprio nome diz, foi utilizado para avaliar o desempenho de cada método, este índice é calculado em função do coeficiente de correlação (r) e de concordância (d) como mostra a equação 8:

$$c = r.d$$

(8)

A avaliação do índice de desempenho é apresentada na tabela 2, conforme descrito por Camargo e Centelhas (1997).

Tabela 2 – Avaliação do índice de desempenho.

c	Desempenho
>0,90	Ótimo
0,81 – 0,90	Muito bom
0,71 – 0,90	Bom
0,51 – 0,70	Mediano
0,41 – 0,50	Sofrível
0,31 – 0,40	Mau
≤0,30	Péssimo

Fonte: Camargo e Centelhas (1997).

## RESULTADOS

A análise da ETo foi realizada com o propósito de avaliar o desempenho do algoritmo SEBAL em relação aos valores obtidos com a equação de Penman-Monteith FAO 56. Na figura 2 são mostrados os resultados das médias diárias do SEBAL em comparação ao método padrão.

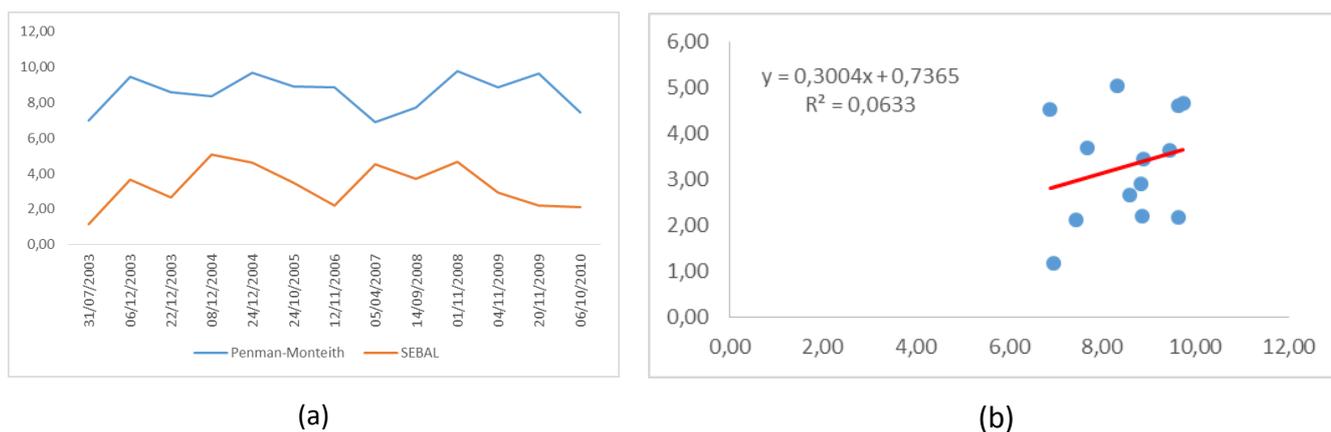


Figura 2 – (a) Médias da ETo diária obtidas pelos métodos de Penman-Monteith e SEBAL. (b) Valores de Eto estimados pelo método SEBAL em relação ao método de Penman-Monteith.

Pode-se observar através dos valores apresentados na tabela 3 que a correlação ( $r$ ) de 0,25 mostrou uma intensidade bem fraca entre os métodos, combinado a um índice de concordância ( $d$ ), conferiu de acordo com o índice proposto por Camargo e Sentelhas (1997) um desempenho ( $c$ ) de 0,19, ou seja, um desempenho péssimo.

Tabela 3 – Resumo das análises estatísticas

Método	a	b	R <sup>2</sup>	r	d	c
SEBAL	0,74	0,30	0,06	0,25	0,75	0,19

Vários trabalhos presentes na literatura mostram o SEBAL como uma alternativa confiável na ausência de maiores informações de ETo, Teixeira et. al. (2009), por exemplo, aplicou o SEBAL para uma área do semi-árido pernambucano e o método se mostrou eficaz ao ser utilizado para quantificação da necessidade de água e o impacto de uma horticultura irrigada.

## CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos no presente estudo pode-se concluir que o desempenho do algoritmo SEBAL não foi satisfatório ao ser comparado com o método padrão. O ideal é que uma maior quantidade de dados seja analisada e as estatísticas sejam recalculadas.

No entanto deve-se levar em consideração a presença dos chamados *outliers* que também prejudicam o desempenho, pois estes tendem a distorcer o valor da média, comprometendo assim o resultado das estimativas e subestimando a verdadeira relação entre os métodos descritos.

Outros métodos para obtenção de ETo também devem ser analisados, tais como os métodos baseados na temperatura e na radiação solar.

## BIBLIOGRAFIA

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; PAES, D.; SMITH, M. (1998). “*Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements.*” Roma: FAO, 328p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).
- BASTIAANSSEN, W. G. M., (2000), “*SEBAL-based sensible and latent heat flux in the irrigated Gediz basin, Turkey*”, Journal of Hydrology, v. 229, pp. 87 – 100.
- BASTIAANSSEN, W.G.M. (1995). “*Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain.*” Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands, 273p.
- BASTIAANSSEN, W.G.M.; MENENTI, M.; FEDDES, R.A.; HOLSTAG, A.A.M. (1998). “*A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation.*” Journal of Hydrology, v. 212-213, p. 198-212.
- BRAUN, P.; MAURER, B.; MULLE R, G.; GROSS, P.; HEINEMANN, G.; SIMMER, C. “*An integrated approach for the determination of regional evapotranspiration using mesoscale*

*modelling, remote sensing and boundary layer measurements.*” Meteorology and Atmospheric Physics , v. 76, p. 83-105, 2001.

CAMARGO A. P.; SENTELHAS, P. C. (1997). “*Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo*”. Revista Brasileira de Agrometeorologia. V. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CHANDER, G.; MARKHAM, B.L.; HELDER, D.L. (2009). “Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors.” Remote Sensing of Environment, v.113, p. 893-903.

MARKHAM, B. L.; BARKER, L. L. (1987). “*Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances.*” International Journal of Remote Sensing, v.8, n.3, p.517- 523.

RAMÍREZ-BUILES, V. H.; E. W. HARMSSEN. (2011). “*Water Vapor Flux in Agroecosystems: Methods and Models Review.*” In: “Evapotranspiration” editado por Leszek Labeledzki, ISBN: 978-953-307-251-7, InTech, Publishing.

SOBRAL, M.C.M.; CARVALHO, M.C.M.O.; da SILVA, M.M.; de MELO, G.L. (2006). “*Uso e ocupação do solo no entorno de reservatórios no semi-árido brasileiro como fator determinante da qualidade da água*”. XXX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Punta del Este, Uruguay, 26 – 30 Nov.

TEIXEIRA, A.H.C.; BASTIAANSEN, W.G.M.; AHMAD, M.D.; BOS,M.G. (2009). “*Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the low-middle São Francisco River Basin, Brazil- Part A: calibration and validation*”. Agricultural and Forest Meteorology, v. 149, n. 3-4, pp. 462-476.

WILLMOTT C. J. (1981). “*On the validaation of models.*” Physical Geography, v. 2, n.2, p. 184-194.