



Evapotranspiração real em bacia hidrográfica do Nordeste brasileiro por meio do SEBAL e produtos MODIS

Leidjane M. M. de Oliveira¹, Suzana M. G. L. Montenegro², Bernardo B. da Silva³, Antonio C. D. Antonino⁴ & Albert E. S. S. de Moura⁵

¹ UFPE. Recife, PE. E-mail: leidjaneoliveira@hotmail.com (Autora correspondente)

² UFPE. Recife, PE. E-mail: suzanam@ufpe.br

³ UFPE. Recife, PE. E-mail: bbdasilva.ufpe@gmail.com

⁴ UFPE. Recife, PE. E-mail: acda@ufpe.br

⁵ IFPB. Cajazeiras, PB. E-mail: albert.moura@ifpb.edu.br

Palavras-chave:

balanço de energia
recurso hídrico
razão de Bowen

RESUMO

Objetivou-se, com este trabalho, avaliar a evapotranspiração real diária – ETr por sensoriamento remoto e comparar os resultados com a ETr obtida segundo o balanço de energia com a técnica da razão de Bowen, na Bacia Hidrográfica do Rio Tapacurá, Pernambuco, Brasil. Utilizaram-se o Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) e produtos do Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) complementados com dados obtidos em campanha experimental conduzida na bacia no período de janeiro de 2010 a agosto de 2011. A ETr pelo SEBAL se situou entre 0 e 6 mm d⁻¹, com maiores valores no reservatório do Tapacurá e os menores nas áreas urbanas. Em áreas de pastagem a ETr obtida pela razão de Bowen variou de 3,6 a 4,9 mm d⁻¹. O SEBAL propiciou resultados da ETr com nível de precisão satisfatório quando comparado com as estimativas da razão de Bowen resultando em Erro Absoluto Médio, Erro Relativo Médio e Raiz do Erro Quadrático Médio, respectivamente iguais a 0,40 mm d⁻¹; 9,63% e 0,51 mm d⁻¹. Concluiu-se que foi possível, não obstante a intensa presença de nuvem na região, obter com precisão a evapotranspiração real diária na Bacia do Rio Tapacurá, com o algoritmo SEBAL baseado em imagens MODIS.

Key words:

energy balance
water resource
Bowen ratio

Real evapotranspiration in catchment area of northeastern Brazil through the SEBAL and MODIS products

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the real daily evapotranspiration - ETr by remote sensing and to compare it with ETr according to the Bowen ratio technique in the Tapacurá River basin, Pernambuco state, Brazil. The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) was used with data from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and meteorological data obtained in a field experiment inside the basin from January 2010 to August 2011. The ETr from SEBAL ranged between 0 and 6 mm d⁻¹, with the highest values registered in the Tapacurá reservoir and the smallest in urban areas inside the basin. The ETr from the Bowen ratio in a pasture area ranged from 3.6 to 4.9 mm d⁻¹. The SEBAL provided good results of the daily evapotranspiration when compared with ETr estimated according to the Bowen ratio technique, resulting in Mean Absolute Error, Relative Error and Average Root Mean Square Error, respectively of 0.40 mm d⁻¹; 9.63% and 0.51 mm d⁻¹. It was concluded that, despite the intense presence of clouds in the region, it was possible to obtain the real daily evapotranspiration in Tapacurá River basin based on MODIS images with good precision.

INTRODUÇÃO

A gestão eficaz dos recursos hídricos é de grande relevância social e ambiental e a sua inobservância pode comprometer a sustentabilidade do uso dos recursos naturais de uma bacia hidrográfica. De fato, para a efetivação de medidas eficazes de gestão dos recursos hídricos faz-se necessário o monitoramento dos principais componentes do ciclo hidrológico, dentre os quais se destaca a evapotranspiração, considerada como o indicador de perda da água da superfície terrestre pela interface solo, planta e atmosfera.

Ao longo dos anos vários métodos diretos e indiretos foram desenvolvidos para estimar a evapotranspiração (i.e. Thornthwaite, Penman-Monteith, Balanço de Energia baseado na Razão de Bowen, Correlação de Vórtices Turbulentos, dentre outros); no entanto, todos esses métodos falham quando o interesse é a obtenção da evapotranspiração em grandes áreas com acentuada heterogeneidade. Neste sentido, os métodos de obtenção da evapotranspiração real diária (ETr) baseados em técnicas de sensoriamento remoto se apresentam com uma opção de baixo custo e com boa precisão não obstante suas limitações quanto à exigência da ausência de nuvens por ocasião

da geração das imagens e questões relacionadas à resolução espacial e temporal dos sensores imageadores mais populares.

O Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) é um algoritmo desenvolvido para estimar o balanço de energia à superfície, por meio de imagens de satélite multiespectrais que propiciem a determinação do albedo e a temperatura da superfície complementados com poucos dados meteorológicos de superfície (Bastiaanssen et al., 1998). O SEBAL tem sido aplicado em diferentes países produzindo resultados significativos com precisão e praticidade, constituindo-se em importante instrumento na especialização da ETr, possibilitando a racionalização do uso dos recursos naturais, avaliação de grandes áreas irrigadas, manejo da irrigação, gerenciamento de recursos hídricos, alterações climáticas e produtividade primária bruta (Bastiaanssen et al., 2005; Mu et al., 2011; Silva et al., 2012; 2013).

A parametrização do algoritmo é aplicada em imagens digitais de qualquer sensor orbital que efetue medidas de radiância no visível, infravermelho próximo e termal, tais como o Landsat 5 - TM (Santos, 2011; Bezerra et al., 2012b); NOAA-AVHRR (Zwart & Bastiaanssen, 2007; Paiva et al., 2011); Terra/MODIS (Andrade et al., 2012; Ruhoff et al., 2012) e Terra/ASTER (Santos et al., 2010).

O sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) se encontra a bordo dos satélites Terra e Aqua, dispõe de 36 bandas com cobertura espectral de 0,4 a 14,40 μm , resolução radiométrica de 12 bits, resolução espacial de 250, 500 e 1.000 m e resolução temporal diária. Há vários produtos elaborados com base nas medições da radiância de suas 36 bandas espectrais, muitos dos quais são disponibilizados em mosaicos (tiles) correspondentes a uma área georreferenciada com lados de 1.200 x 1.200 km.

Outra metodologia bastante utilizada para determinação da evapotranspiração é o método do balanço de energia pela razão de Bowen (BERB). Trata-se de um método micrometeorológico muito prático cujos dados de entrada compreendem medições do saldo de radiação, fluxo de calor no solo e medidas da temperatura e umidade do ar em dois níveis acima da superfície de interesse (Allen et al., 2011). O BERB tem sido largamente utilizado por diversos pesquisadores visando à determinação de coeficientes de culturas (Hou et al., 2010; Bezerra et al., 2012a); calibração e validação de métodos indiretos e diretos de determinação da evapotranspiração (Lima et al., 2011) e determinação das componentes do balanço de energia e evapotranspiração (Azevedo et al., 2007).

Na Bacia Hidrográfica do Rio Tapacurá localiza-se o reservatório de mesmo nome que tem capacidade de acumulação de 94.200.000 m³, sendo considerado o manancial mais importante para o abastecimento público da Região Metropolitana do Recife beneficiando mais de um milhão de habitantes. Esta condição confere, a esta bacia, grande importância e a gestão dos seus recursos hídricos se torna imprescindível; contudo sua localização no Litoral e Zona da Mata da região Nordeste do Brasil representa um grande desafio quanto à determinação da evapotranspiração com a

utilização de imagens orbitais, em virtude da presença intensa de nebulosidade.

Neste contexto esta pesquisa objetivou avaliar a evapotranspiração real diária por meio do SEBAL e comparar os resultados com a ETr obtida com a técnica de razão de Bowen na Bacia Hidrográfica do Rio Tapacurá, estado de Pernambuco, Brasil, mesmo sendo uma região sujeita à presença frequente de nuvens.

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada na Bacia Hidrográfica do Rio Tapacurá (Figura 1) Sub- Bacia do Rio Capibaribe, Pernambuco, Brasil, integrante da Rede de Hidrologia do Semiárido (REHISA) com área de drenagem de aproximadamente 480 km² (Oliveira et al., 2012).

Esta bacia é composta por doze sub-bacias, as principais formadas pelos riachos Itapessirica, Natuba, Gameleira e Várzea do Una. Entre os meses de março a julho ocorre a estação chuvosa com índice pluviométrico anual médio de 1.017 mm, temperatura média mensal entre 23,7 e 27,0 °C e umidade relativa do ar superior a 75% nos meses de maio a agosto.

Foi instalada uma estação meteorológica experimental (08° 05' 19" S; 35° 14' 56" W; 143 m; Figura 1), totalmente automatizada, com sete sensores para medições de: temperatura e umidade relativa do ar (dois termohigrômetros, modelo HMP45C da Vaisala Inc, Finlândia, níveis $z_1 = 0,30$ m e $z_2 = 1,30$ m a partir do dossel da vegetação), velocidade do vento (dois anemômetros modelos 014A da Met One, Estados Unidos, níveis $z_1 = 0,30$ m e $z_2 = 1,30$ m a partir do dossel da vegetação); saldo de radiação (saldo radiômetro modelo NR-LITE da Kipp & Zonen, Holanda), radiação solar global (piranômetro modelo CS300 da Kipp & Zonen, Holanda) e precipitação (pluviômetro modelo TB4 da Campbell Scientific, Estados Unidos). Os sensores foram acoplados a dois sistemas de aquisição de dados CR-1000 da Campbell Scientific programados para efetuar leitura dos sensores a cada 5 s e extrair médias a cada 30 min. O local escolhido para implantação da estação meteorológica experimental apresentou alcance geográfico com significativa área de bordadura na qual se observou extensa escala

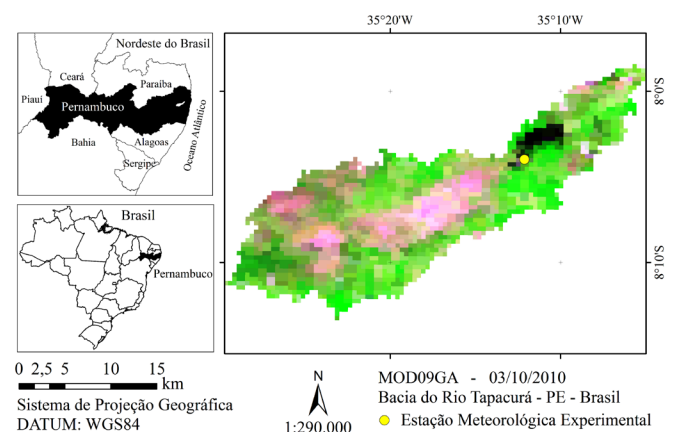


Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Tapacurá, PE, Brasil

homogênea de cobertura vegetal com pasto em capim-lucas (*Sporobolus Indicus*).

Os produtos MOD11 e MYD11 derivados, respectivamente, do MODIS Terra e Aqua, disponibilizam imagens da temperatura da superfície; já os produtos MOD09 e MYD09, do MODIS Terra e Aqua, respectivamente, reúnem imagens da reflectância espectral da superfície para cada banda deste sensor, que é utilizada no cômputo dos balanços de radiação e energia.

No SEBAL a evapotranspiração real diária (ET_r, mm d⁻¹) é obtida por meio de (Bastiaanssen, 2000; Bezerra et al., 2012b):

$$ET_r = 0,035 \left(\frac{LE}{R_n - G} \right) [(1 - \alpha) R_{oc,24h} - 110 \tau_{24h}] \quad (1)$$

em que:

LE - fluxo de calor latente, W m⁻²

R_n - saldo instantâneo de radiação (obtido com o MOD11A1 e MOD09GA), W m⁻²

G - fluxo de calor no solo (Andrade et al., 2012; Silva et al., 2012), W m⁻²

α - albedo da superfície (obtido com o produto MOD09GA), adimensional

R_{OC,24h} - radiação solar global diária medida na estação meteorológica experimental, W m⁻²

τ_{24h} - transmissividade atmosférica média diária e 0,035 fator de conversão de W m⁻² para mm d⁻¹, adimensional

A carta temática do fluxo de calor sensível (H, W m⁻²) é o diferencial do algoritmo SEBAL e os valores, pixel a pixel, foram estimados com base na velocidade do vento e a diferença da temperatura do ar (dT) entre dois níveis próximos da superfície (Z₁ = 0,1 m e Z₂ = 2 m) conforme (Bastiaanssen et al., 1998; Allen et al., 2007; Anderson et al., 2012; Silva et al., 2012):

$$H = \frac{\rho c_p dT}{r_{ah}} \quad (2)$$

em que:

ρ - densidade do ar atmosférico, kg m⁻³

c_p - calor específico do ar à pressão constante, J kg⁻¹ K⁻¹

r_{ah} - resistência aerodinâmica ao transporte de calor sensível, s m⁻¹

A suposição principal do algoritmo é considerar a linearidade entre a diferença da temperatura do ar (dT) e a temperatura da superfície (dT = a + b T_{sup}) cujas constantes de calibração “a” e “b” são obtidas em pixels com condições extremas de temperatura e disponibilidade hídrica: um pixel frio (localizado no reservatório do rio Tapacurá) com H = 0 e um pixel quente (área com pouca ou nenhuma presença de vegetação e baixo conteúdo de umidade) em que LE = 0, ou seja, H = R_n - G, o que tornou possível obter os valores das constantes de calibração (Bastiaanssen et al., 1998; Papadavid et al., 2013).

As cartas temáticas com os valores de H são as bases do processo iterativo identificando-se a condição de estabilidade

atmosférica de cada pixel pela teoria de similaridade de Monin-Obukhov representada por $L = -\rho c_p u^* T_{sup} / kgH$, em que: u* (m s⁻¹) a velocidade de fricção; T_{sup} (K) temperatura da superfície; k = 0,41 (adimensional) constante de von Karman e g (m s⁻²) módulo do campo gravitacional terrestre. Neste processo o H inicial é obtido ao se considerar a condição de estabilidade neutra e possibilitará a aplicação das correções para novos valores de u* e r_{ah}. Após o cálculo da r_{ah,cor} determinaram-se novos valores de “a” e “b”, conseqüentemente novo dT que vai gerar um novo mapa temático do H e um novo comprimento de Monin-Obukhov que, por sua vez, possibilitará a determinação da nova condição de estabilidade atmosférica e novas correções da velocidade de fricção e resistência aerodinâmica. O processo iterativo atinge a convergência quando o erro relativo entre as resistências aerodinâmicas for menor que 1%.

No Balanço de Energia pela Razão de Bowen (BERB) a razão entre os fluxos de calor sensível (H) e de calor latente (LE) é definida como Razão de Bowen - β, que pode ser determinada com medições das diferenças da temperatura do ar e pressão de vapor em dois níveis acima do dossel da vegetação (Hou et al., 2010; Allen et al., 2011; Lima et al., 2011):

$$\beta = \frac{H}{LE} = \gamma \left(\frac{\Delta T}{\Delta e} \right) \quad (3)$$

em que:

γ - constante psicrométrica = 0,066 kPa °C⁻¹

ΔT - diferença de temperatura do ar entre dois níveis, °C

Δe - diferença da pressão de vapor entre dois níveis, kPa

A partir das medições do R_n, G, ΔT e Δe, juntamente com a equação simplificada do balanço de energia (R_n = LE + G + H) e se utilizando a razão de Bowen (β) foram calculados os LE e H, respectivamente, por: LE = (R_n-G)/(1+β) e H = (β/1+β) x(R_n-G).

Como o intervalo de tempo dos dados coletados foi de 30 min, calculou-se a evapotranspiração real pelo BERB (ET_{BERB}, mm d⁻¹) no período em que R_n - G > 0, por:

$$ET_{BERB} = \frac{1800}{L_v} \int_{i=1}^{i=n} LE_i \quad (4)$$

em que:

1800 - fator de integração do valor instantâneo para o período de 30 min

L_v - calor latente de evaporação da água, 2,45 MJ kg⁻¹

n - número de intervalos de tempo semi-horários em que R_n - G > 0

Objetivando diminuir ao máximo os valores inconsistentes decorrentes da suposição de igualdade entre os coeficientes de difusão turbulenta para o calor sensível e vapor d'água sob condições de advecção de calor sensível, foram aplicados filtros de exclusão e substituição por interpolação dos valores precedentes e subsequentes válidos, aqueles resultados nos quais a razão de Bowen foi menor que -0,75, bem como aqueles

valores cujas medições dos gradientes de temperatura e de pressão de vapor estavam menores do que o limite da resolução dos sensores (Lima et al., 2011).

Para a análise comparativa entre a ET_SEBAL e ET_BERB foram utilizados o Erro Absoluto Médio – EAM (mm d⁻¹) o Erro Relativo Médio - ERM (%) e a Raiz do Erro Quadrático Médio – REQM (mm d⁻¹):

$$EAM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_{est} - X_{obs}| \quad (5)$$

$$ERM = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{est} - X_{obs}}{X_{obs}} \right| \quad (6)$$

$$REQM = \left(\sum_{i=1}^N \frac{(X_{est} - X_{obs})^2}{N} \right)^{1/2} \quad (7)$$

em que:

X_{est} - valor da ET_SEBAL

X_{obs} - valor da ET_BERB

N - número de pares das variáveis.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O período chuvoso nos anos de 2010 e 2011, compreendido pelos meses de março a julho totalizou, respectivamente, 916 e 1.670 mm. A temperatura do ar média diária em 2010 variou de 21,7 a 28 °C enquanto que até agosto de 2011 foi de 22,1 a 27,4 °C, apresentando a mesma tendência de comportamento, qual seja: temperaturas maiores entre os meses de janeiro a maio e menores até início de outubro; já a umidade relativa média diária se manteve entre 66 e 89% (2010) apresentando valores maiores que 75% de março a setembro enquanto de janeiro a agosto de 2011 os valores foram entre 65 e 96%; entretanto, os valores maiores que 75% foram detectados a partir de abril.

Na Tabela 1 estão representados alguns dados empregados no cômputo da evapotranspiração com produtos MODIS e alguns dados obtidos localmente.

A variação espaço-temporal da ETr na Bacia do Rio Tapacurá está representada na Figura 2. Observa-se que a ETr variou de 0 a 6 mm d⁻¹, resultado semelhante ao obtido por Mendonça et al. (2012) com a utilização de produtos MODIS em cana-de-açúcar,

que detectaram classes de ETr com valores entre 0,0 e 6,9 mm d⁻¹ (15/08/2005). Ainda com produtos MODIS, Andrade et al. (2012) encontraram evapotranspiração variando de 0 a 5,5 mm d⁻¹ em extensa área savana/cerrado do bioma Pantanal.

Ao se observar a Figura 2 fica claramente evidenciada a baixa magnitude da ETr (0 a 0,5 mm d⁻¹) concentrada sobretudo nas áreas urbanas das cidades de Vitória de Santo Antão e Pombos; opostamente, os pixels que representaram alvos em áreas vegetadas apresentaram ETr até 6,0 mm d⁻¹. Especificamente, as classes de ETr variando de 4,7 a 6,0 mm d⁻¹ se encontram nos pixels que definem o reservatório do Tapacurá e com mais suavidade todo o seu entorno de mata ciliar. Com magnitudes similares, Andrade et al. (2012) encontraram valores de ETr de 4,0 a 5,5 mm d⁻¹ em áreas com presença predominante de corpos hídricos.

Na Bacia do Rio Tapacurá a ETr variou, em toda a bacia, de 1,236 x 10⁶ a 1,643 x 10⁶ m³ d⁻¹, registrados ao se integrar os dados de cada pixel da bacia aos dias 03/07/2010 e 07/05/2010. Registrou-se também, no ano de 2011, que a ETr variou de 1,097 x 10⁶ a 1,821 x 10⁶ m³ d⁻¹, respectivamente, em 20/06/2011 e 17/03/2011.

Para contornar a possibilidade da mistura espectral decorrente da resolução espacial da carta gerada com o SEBAL e o MODIS (463,31 m) e não influenciar na validação da metodologia com o BERB, registraram-se os valores da ETr do pixel referente à coordenada da estação meteorológica experimental (“pixel a”) tal como dos oito pixels adjacentes (pixels de “b” até “i”) verificando-se o comportamento do erro relativo de cada pixel em comparação com a evapotranspiração pelo BERB (Figura 3).

Observa-se, na configuração gráfica dos valores de cada pixel, tanto o central como os adjacentes, que nos dias 10/03/2010 (Figura 3A) e 17/03/2011 (Figura 3G) apresentaram valores mais próximos da ET_BERB, comprovados com os menores erros relativos detectados, 0,56 e 0,33%, respectivamente.

A estimativa da ETr pela metodologia BERB variou de 3,6 a 4,9 mm d⁻¹ (Tabela 2); este resultado condiz com Bezerra et al. (2010) quando obtiveram a ETr pela metodologia do BERB no Ceará, nos anos de 2003 e 2005 com cultura de algodão irrigado e encontraram, para cada ciclo da cultura, valores de 3,8 a 5,9 mm d⁻¹. Já Lima et al. (2011) encontraram, com esta mesma metodologia em feijão caupi sob condições de sequeiro, valores de 2,2 a 5,8 mm d⁻¹ sendo o valor médio registrado na área de estudo de 3,8 mm d⁻¹.

Tabela 1. Datas das imagens do MODIS; sistema satélite/sensor; hora de passagem do satélite (h); ângulo zenital do sol (Z, grau), pressão atmosférica (P, kPa); temperatura do ar (Ta, °C); umidade relativa (UR, %); radiação solar global (R_{oc}, W m⁻²) e transmissividade atmosférica da radiação solar (τ; adimensional)

Data da imagem	Satélite Sensor	Hora (h)	Z (graus)	P (kPa)	Ta (°C)	UR (%)	R _{oc} (W m ⁻²)	τ
10/03/2010	Terra/MOD	10:00	32,3	99,692	32,9	31,9	870,5	0,746
30/04/2010	Terra/MOD	10:30	31,3	99,682	30,9	52,7	820,5	0,730
07/05/2010	Aqua/MYD	13:30	34,4	99,682	31,0	50,6	636,9	0,727
03/07/2010	Aqua/MYD	13:24	36,8	99,670	28,8	44,4	654,1	0,736
15/08/2010	Terra/MOD	10:12	35,4	99,664	27,6	61,0	776,6	0,726
03/09/2010	Aqua/MYD	13:36	28,8	99,669	28,6	43,7	734,2	0,747
17/03/2011	Aqua/MYD	14:06	30,5	99,699	34,3	36,8	699,8	0,738
20/06/2011	Aqua/MYD	13:24	37,4	99,671	28,9	57,3	540,5	0,723

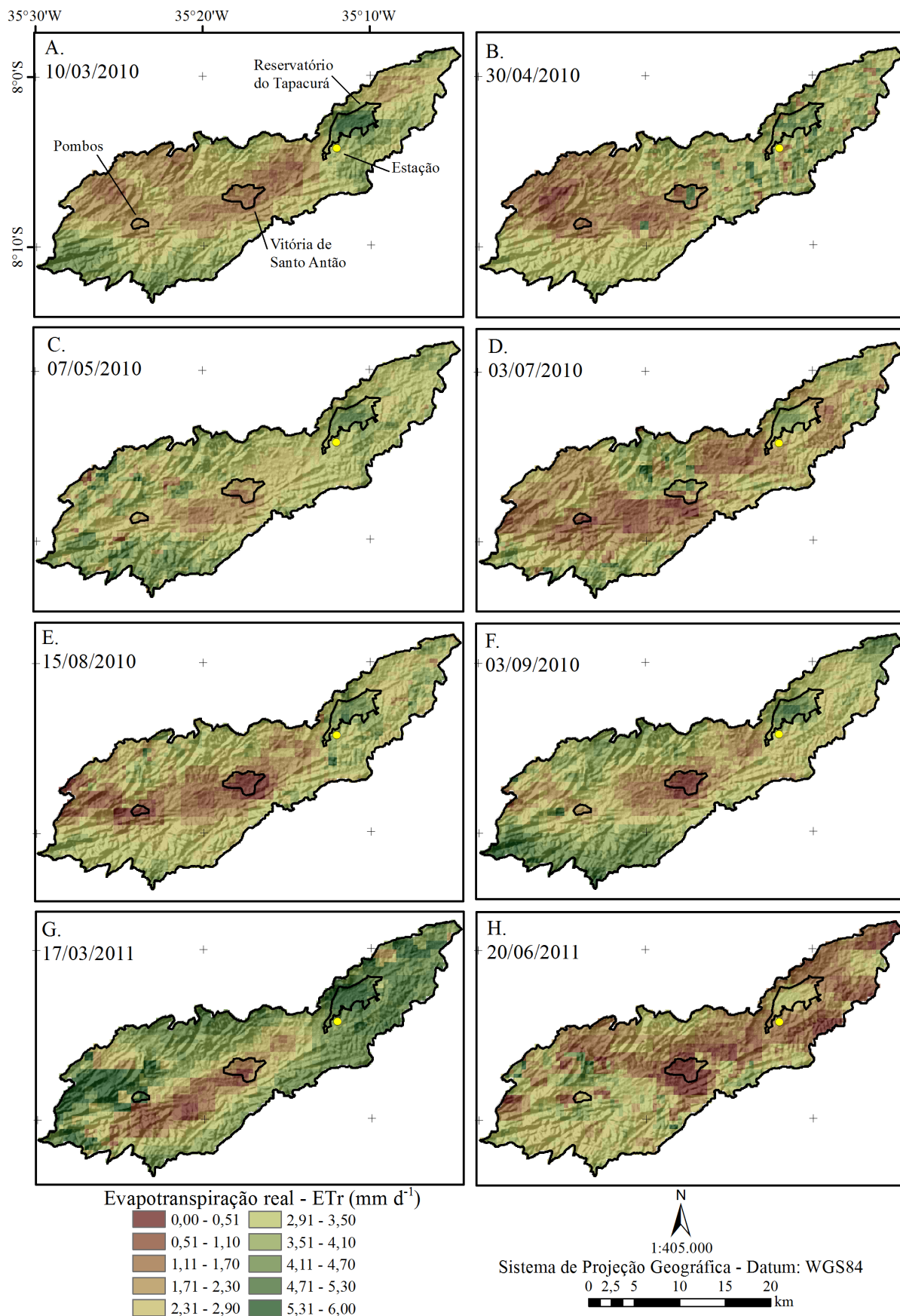


Figura 2. Evapotranspiração real diária da Bacia do Rio Tapacurá, Pernambuco, Brasil obtida pelo SEBAL com utilização de produtos MODIS nos dias: 10/03/2010 (A); 30/04/2010 (B); 07/05/2010 (C); 03/07/2010 (D); 15/08/2010 (E); 03/09/2010 (F); 17/03/2011 (G) e 20/06/2011 (H)

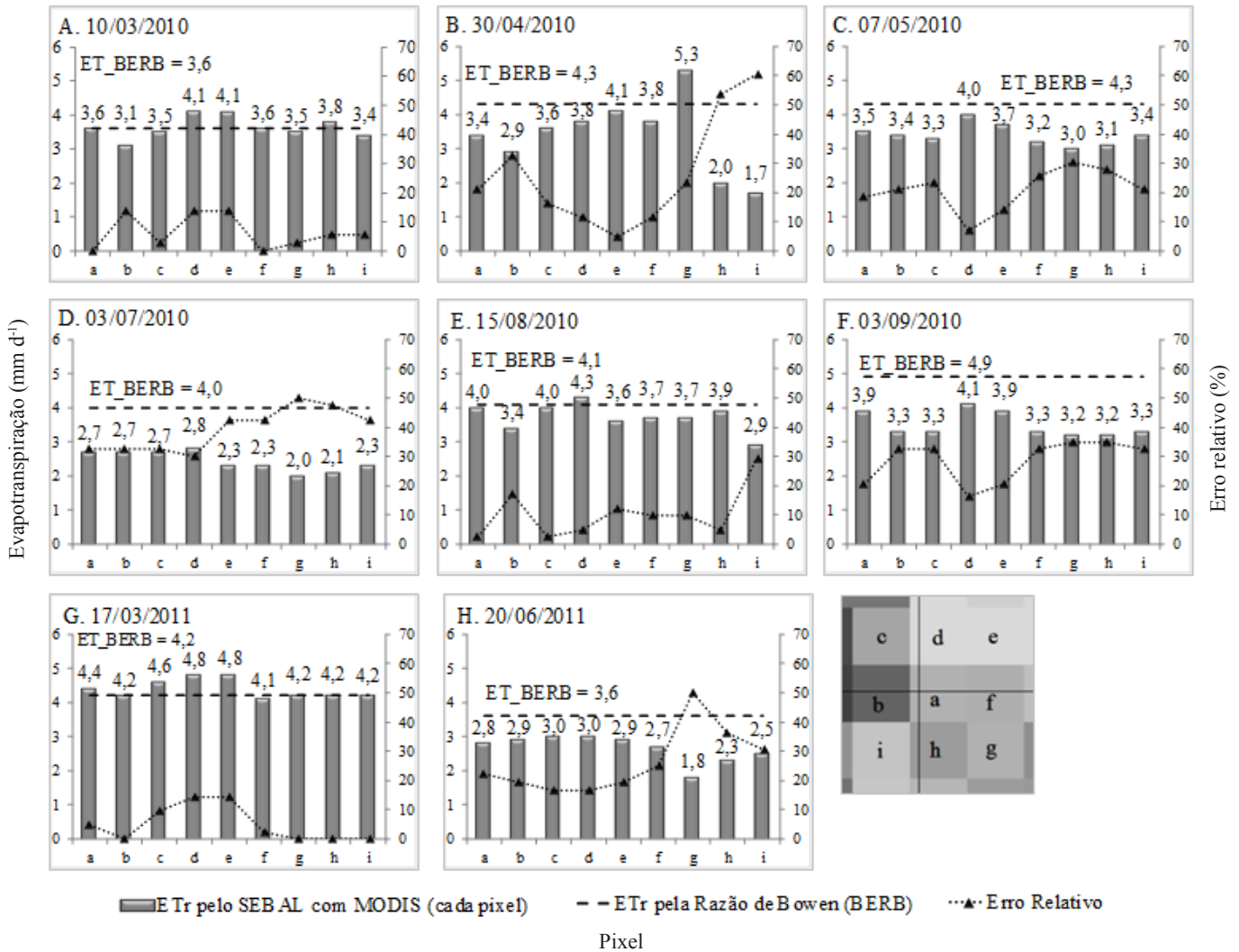


Figura 3. Valores da evapotranspiração real pelo SEBAL (ET_SEBAL e pelo BERB (ET_BERB) em cada pixel adjacente com os erros relativos da Bacia do Rio Tapacurá, PE, nos dias 10/03/2010 (A); 30/04/2010 (B); 07/05/2010 (C); 03/07/2010 (D); 15/08/2010 (E); 03/09/2010 (F); 17/03/2011 (G) e 20/06/2011 (H)

Quando se analisam, na Tabela 2, os valores da ETr em cada meia hora, observa-se que ER variou de 3,85 a 23,53% e o EA variou de 0,01 a 0,08 mm 30 min⁻¹. Esses resultados foram maiores que os obtidos por Bezerra et al. (2008) ao validarem a evapotranspiração real horária do SEBAL com o BERB. Os autores relataram que em culturas de algodão e mamona, em área localizada no Cariri cearense, o Erro Relativo variou de 3,80 a 9,60% e o Erro Absoluto variou de 0,02 a 0,08 mm h⁻¹.

Ressalte-se que para esta pesquisa a cobertura vegetal era de capim-lucas e a de Bezerra et al. (2008) algodão e mamona. Ademais, nesta pesquisa foi usado o sensor MODIS (resolução espacial de 500 m) e em Bezerra et al. (2008) TM - Landsat5 (resolução espacial de 30 m).

Os valores da ET_SEBAL diária nos pixels que apresentaram menores erros relativos variaram de 2,8 a 4,2 mm d⁻¹ e da ET_BERB entre 3,6 e 4,9 mm d⁻¹ (Tabela 2). Esses resultados

Tabela 2. Valores da evapotranspiração real pelo SEBAL e pela Razão de Bowen em cada meia hora e diária, Erro Relativo (ER, %) e Erro Absoluto (EA, mm d⁻¹) na localização da estação meteorológica experimental

Data	Evapotranspiração							
	Meia hora (mm 30min ⁻¹)				Diária (mm d ⁻¹)			
	SEBAL	BERB	ER	EA	SEBAL	BERB	ER	EA
10/03/2010	0,24	0,29	17,24	0,05	3,6	3,6	0,00	0,00
30/04/2010	0,32	0,37	13,51	0,05	4,1	4,3	4,65	0,20
07/05/2010	0,24	0,25	4,00	0,01	4,0	4,3	6,98	0,30
03/07/2010	0,22	0,27	18,52	0,05	2,8	4,0	30,0	1,20
15/08/2010	0,37	0,33	12,12	0,04	4,0	4,1	2,44	0,10
03/09/2010	0,26	0,34	23,53	0,08	4,1	4,9	16,33	0,80
17/03/2011	0,25	0,26	3,85	0,01	4,2	4,2	0,00	0,00
20/06/2011	0,23	0,30	23,33	0,07	3,0	3,6	16,67	0,60

condizem com os de Nagler et al. (2005) que obtiveram valores de evapotranspiração variando de 4 a 5 mm d⁻¹ no Estado do Novo México, Estados Unidos, em superfície coberta com Tamarisk. Em pesquisa mais recente com imagens TM Landsat 5, Santos (2011) encontrou, na mesma vegetação de Tamarisk, os valores da evapotranspiração média, máxima e mínima, de 3,2; 7,6 e 0,1 mm d⁻¹, respectivamente.

Ruhoff et al. (2012) validaram a evapotranspiração real pelo SEBAL / MODIS com medidas pelo Sistema de Vórtices Turbulentos. Os valores da evapotranspiração obtidos apresentaram variâncias semelhantes entre os dados observados e os estimados e em concordância com a literatura. Na estação chuvosa do período a evapotranspiração média na cana-de-açúcar foi 5,9 mm d⁻¹ e no cerrado de 6,6 mm d⁻¹ enquanto o valor médio observado foi de 6,5 mm d⁻¹; já na estação seca a evapotranspiração média na cana-de-açúcar foi 1,5 mm d⁻¹ e no cerrado 2,3 mm d⁻¹ enquanto o valor médio observado foi de 1,2 mm d⁻¹.

Os dados resumidos na Tabela 2 demonstraram a sensível diminuição do erro diário quando comparado com os valores dos milímetros em 30 min. O Erro Relativo variou de 0,0 a 30,0% e o Erro Absoluto variou de 0,0 a 1,2 mm d⁻¹. Evidencia-se que os resultados apresentaram uma relativa concordância visto que, exceto dos dias 03/07/2010 (EA = 1,2 mm d⁻¹) e 03/09/2010 (EA = 0,8 mm d⁻¹) nos dias restantes este erro foi inferior a 0,6 mm d⁻¹. Este resultado do Erro Absoluto condiz com os de Bezerra et al. (2008) que variaram de 0,1 a 0,5 mm d⁻¹; entretanto, o Erro Relativo não teve o mesmo comportamento de vez que os autores encontraram valores de Erro Relativo na variação de 1,90 a 9,40%.

Na análise com os pixels de menores Erros Relativos obviamente os valores da ET_SEBAL se mantiveram mais próximos ainda dos valores da ET_BERB. Foram obtidos o Erro Absoluto Médio – EAM (mm d⁻¹), Erro Relativo Médio – ERM (%) e Raiz do Erro Quadrático Médio – REQM (mm d⁻¹) que foram respectivamente iguais a 0,40 mm d⁻¹, 9,63% e 0,51 mm d⁻¹. Este estudo condiz com o realizado por Santos (2011) na validação do SEBAL com os dados obtidos pelo BERB e obteve erro quadrático médio de 0,4 mm d⁻¹ e erro médio percentual de 9,5%. Este resultado evidenciou a eficiência da aplicação do SEBAL na determinação da evapotranspiração real diária na Bacia do Rio Tapacurá, Pernambuco, Brasil.

CONCLUSÕES

1. A metodologia avaliada propiciou resultados diários da evapotranspiração em área do Nordeste brasileiro com nível de precisão satisfatório e aceitável, apresentando diferenças inferiores a 10%, quando comparadas com estimativas da técnica de razão de Bowen, não obstante a presença significativa da nebulosidade na região.

2. O SEBAL compreende uma ferramenta prática, econômica e eficiente na geração de subsídios à adequada gestão dos recursos hídricos.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Doutorado do primeiro autor, pela bolsa de Produtividade em Pesquisa concedida aos segundo, terceiro e quarto autores e pela bolsa de Pós-Doutorado do quinto autor; à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo apoio financeiro; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) Brasil pela concessão de bolsa de pós-doutorado do primeiro autor e apoio financeiro; à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) e à Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) pela concessão de bolsa de pós-doutorado ao primeiro autor.

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Howell, T. A.; Jensen, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, v.98, p.899-920, 2011.
- Allen, R. G.; Tasumi, M.; Trezza, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.133, p.380-394, 2007.
- Anderson, M. C.; Allen, R. G.; Morse, A.; Kustas, W. P. Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. *Remote Sensing of Environment*, v.122, p.50-65, 2012.
- Andrade, R. G.; Sedyama, G. C.; Paz, A. R. da; Lima, E. de P.; Facco, A. G. Geotecnologias aplicadas à avaliação de parâmetros biofísicos do Pantanal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.47, p.1227-1234, 2012.
- Azevedo, P. V. de; Souza, C. B. de; Silva, B. B. da; Silva, V. de P. R. da. Water requirements of pineapple crop grown in a tropical environment, Brazil. *Agricultural Water Management*, v.88, p.201-208, 2007.
- Bastiaanssen, W. G. M. SEBAL - Based sensible and latent heat fluxes in the irrigated gediz basin. Turkey. *Journal of Hydrology*, v.229, p.87-100, 2000.
- Bastiaanssen, W. G. M.; Menenti, M.; Feddes, R. A.; Holtslag, A. A. M. The surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part 1, formulation, *Journal of Hydrology*, v.212-213, p.198-212, 1998.
- Bastiaanssen, W. G. M.; Noordman, E. J. M.; Pelgrum, H.; Davids, G.; Thoreson, B. P.; Allen, R. G. SEBAL model with remotely sensed data to improve water resources management under actual field conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.131, p.85-89, 2005.
- Bezerra, B. G.; Silva, B. B. da; Bezerra, J. R. C.; Sofiatti, V.; Santos, C. A. C. dos. Evapotranspiration and crop coefficient for sprinkler-irrigated cotton crop in Apodi Plateau semiarid lands of Brazil. *Agricultural Water Management*, v.107, p.86-93, 2012a.
- Bezerra, B. G.; Silva, B. B. da; Ferreira, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM – Landsat 5. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.23, p.305-317, 2008.

- Bezerra, J. R. C.; Azevedo, P. V. de; Silva, B. B. da; Dias, J. M. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do algodoeiro BRS-200 marrom, irrigado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.625-632, 2010.
- Bezerra, M. V. C.; Silva, B. B. da; Bezerra, B. G.; Borges, V. P.; Oliveira, A. S. de. Evapotranspiração e coeficiente de cultura do algodoeiro irrigado a partir de imagens de sensores orbitais. *Revista Ciência Agronômica*, v.43, p.64-71, 2012b.
- Hou, L. G.; Xiao, H. L.; Si, J. H.; Xiao, S. C.; Zhou, M. X.; Yang, Y. G. Evapotranspiration and crop coefficient of *Populus euphratica* Oliv forest during the growing season in the extreme arid region northwest China. *Agricultural Water Management*, v.97, p.351-356, 2010.
- Lima, J. R. de S.; Antonino, A. C. D.; Lira, C. A. B. de O.; Souza, E. S. de; Silva, I. de F. da. Balanço de energia e evapotranspiração de feijão caupi sob condições de sequeiro. *Revista Ciência Agronômica*, v.42, p.65-74, 2011.
- Mendonça, J. C.; Sousa, E. F. de; André, R. G. B.; Silva, B. B. da; Ferreira, N. de J. Assessment of evapotranspiration in North Fluminense Region, Brazil, using Modis products and Sebal algorithm. In: Irmak, A. (org.). *Evapotranspiration - Remote sensing and modeling*. 1.ed. Rijeka: Intech, 2012. p.1-18.
- Mu, Q.; Zhao, M.; Running, S.W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, v.115, p.1781-1800, 2011.
- Nagler, P. L.; Scott, R. L.; Westenburg, C.; Cleverly, J. R.; Glenn, E. P.; Huete, A. R. Evapotranspiration on western U.S. rivers estimated using the Enhanced Vegetation Index from MODIS and data from eddy covariance and Bowen ratio flux towers. *Remote Sensing of Environment*, v.97, p.337-351, 2005.
- Oliveira, L. M. M. de; Montenegro, S. M. G. L.; Antonino A. C. D.; Silva, B. B. da; Machado, C. C. C.; Galvêncio, J. D. Análise quantitativa de parâmetros biofísicos de bacia hidrográfica obtidos por sensoriamento remoto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.47, p.1209-1217, 2012.
- Paiva, C. M.; França, G. B.; Liu, W. T. H.; Rotunno Filho, O. C. A comparison of experimental energy balance components data and SEBAL model results in Dourados, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, v.32, p.1731-1745, 2011.
- Papadavid, G.; Hadjimitsis, D. G.; Toullos, L.; Michaelides, S. A Modified SEBAL modeling approach for estimating crop evapotranspiration in Semi-arid conditions. *Water Resources Management*, v.27, p.3493-3506, 2013.
- Ruhoff, A. L.; Paz, A. R.; Collischonn, W.; Aragão, L. E. O. C.; Rocha, H. R.; Malhi, Y. S. A MODIS-Based energy balance to estimate evapotranspiration for clear-sky days in Brazilian tropical savannas. *Remote Sensing*, v.4, p.703-725, 2012.
- Santos, C. A. C. dos. Análise das necessidades hídricas da vegetação Tamarisk através da razão de Bowen e do modelo SEBAL. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.26, p.85-94, 2011.
- Santos, T. V. dos; Fontana, D. C.; Alves, R. C. M. Avaliação de fluxos de calor e evapotranspiração pelo modelo SEBAL com uso de dados do sensor ASTER. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.45, p.488-496, 2010.
- Silva, B. B. da; Braga, A. C.; Braga, C. C.; Oliveira, L. M. M. de; Galvêncio, J.D.; Montenegro, S. M. G. L. Evapotranspiração e estimativa da água consumida em perímetro irrigado do semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.47, p.1218-1226, 2012.
- Silva, B. B. da; Galvêncio, J. D.; Montenegro, S. M. G. L.; Machado, C. C. C.; Oliveira, L. M. M. de; Moura, M. S. B. de. Determinação por sensoriamento remoto da produtividade primária bruta do perímetro irrigado São Gonçalo, PB. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.28, p.57-64, 2013.
- Zwart, S. J.; Bastiaanssen, W. G. M. SEBAL for detecting spatial variation of water productivity and scope for improvement in eight irrigated wheat systems. *Agricultural Water Management*, v.89, p.287-296, 2007.