

Estimativa da evapotranspiração real diária para a microbacia do rio das Lontras utilizando algoritmo SEBAL e imagens Landsat 8

Bruno Bonemberger da Silva¹
Fernanda Cristina Araujo¹
Erivelto Mercante¹
Marcio Antonio Vilas Boas¹
Suzana Costa Wrublack¹

¹ Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE
Caixa Postal 711 - 85819-000 - Cascavel - PR, Brasil
{bruno_bonemberger, fer.crisaraujo, eriveltomercante}@yahoo.com.br
marcio.vilasboas@unioeste.br
wrublack@hotmail.com

Abstract. This study estimated the daily actual evapotranspiration (ET_{24h}) of the rio das Lontras watershed, through the satellite-based model *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), using meteorological data and Landsat 8 OLI/TIRS image (julian day 259). In order to analyze the results, maps were created and statistical parameters were calculated to different samples of land use. The SEBAL algorithm calculates the hourly evapotranspiration from the latent heat flux, estimated from the surface energy balance. The highest mean LE values were found in dense vegetation áreas, in native vegetation (495 W.m^{-2}), followed by water and agriculture (376 e 307 W.m^{-2} , respectively). The lowest mean values were found in urban (114 W.m^{-2}) and bare soil (25 W.m^{-2}) areas, regions with more energetic loss by reflection and emission. ET_{24h} had similar behavior of LE with the highest mean values for native vegation, water and agriculture $6,6$, $5,01$ e $4,09 \text{ mm.day}^{-1}$, respectively. The lowest values were concentrated in urban and bare soil areas, ranging from $0,05$ to $2,12 \text{ mm.day}^{-1}$. The algorithm SEBAL estimated, satisfactorily, values of ET_{24h} on the studied watershed when compared to results from other studies using surface observations data. Futhermore, Landsat 8 OLI/TIRS images can be used for monitoring land degradation areas.

Palavras-chave: energy balance, water resources management, land use, balanço de energia, gestão de recursos hídricos, uso e ocupação do solo.

1. Introdução

A pressão por uma utilização dos recursos hídricos de maneira racional, visando o desenvolvimento sustentável por parte dos órgãos gestores e os outros usuários de água é constante sobre os irrigantes. Para se alcançar tal objetivo, Moreira et al., (2010) ressaltam a importância de quantificar a real demanda hídrica de uma cultura, a qual é principalmente representada por sua evapotranspiração (ET).

O usuário de irrigação deve ter o conhecimento da evapotranspiração para determinação das reais necessidades hídricas da cultura, atendendo desta forma os conceitos de desenvolvimento sustentável. Portanto, as estimativas dos fluxos radiativos e energéticos permitem o entendimento e consequente possibilitam a estimativa da evapotranspiração. Além disso, a estimativa da evapotranspiração é componente essencial em modelos hidrológicos, usada também pra estimativa de umidade no solo, e é variável de entrada para modelos de previsão do tempo e inundações (Allen et al., 2007).

Os métodos de balanço de energia utilizando medidas provenientes de satélite têm a vantagem que por consideraram as condições de cultivo, eles não exigem uma classificação das culturas. No entanto, para alguns deles como o SEBAL, é necessário à identificação de condições extremas na imagem, que pode ser difícil durante as estações chuvosas (TEIXEIRA et al., 2008).

Várias técnicas têm sido desenvolvidas com a finalidade de estimar o mais precisamente possível a ET_r utilizando imagens de satélite, a exemplo do METRIC - *Mapping*

Evapotranspiration at High Spatial Resolution with Internalized Calibration (Allen et al., 2007) e o SAFER - *Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving* (Teixeira et al., 2008). Já o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm*), proposto por Bastiaanssen et al. (1998), vem sendo aplicado com êxito em diversos ecossistemas do globo. No SEBAL a ET_r é obtida como resíduo da equação do balanço de energia. O algoritmo pode ser aplicado em dados radiométricos de qualquer sensor orbital que efetue medidas de radiância no espectro do visível, infravermelho próximo (NIR) e infravermelho termal (TIR).

Diante do exposto, o objetivo do trabalho foi a estimativa da evapotranspiração real diária (ET_r) para a microbacia do rio das Lontras, com a utilização do algoritmo SEBAL e imagens do satélite Landsat 8 do sensor OLI/TIRS.

2. Metodologia de trabalho

2.1 Área de estudo

O trabalho foi desenvolvido na microbacia do rio das Lontras localizada entre os municípios de Nova Esperança do Sudoeste ($25^{\circ}54'02''S$; $53^{\circ}15'44''W$) e Salto do Lontra ($25^{\circ}47'02''S$; $53^{\circ}18'31''W$). Na Figura 1, encontra-se o mapa de localização do microbacia do Rio das Lontras.

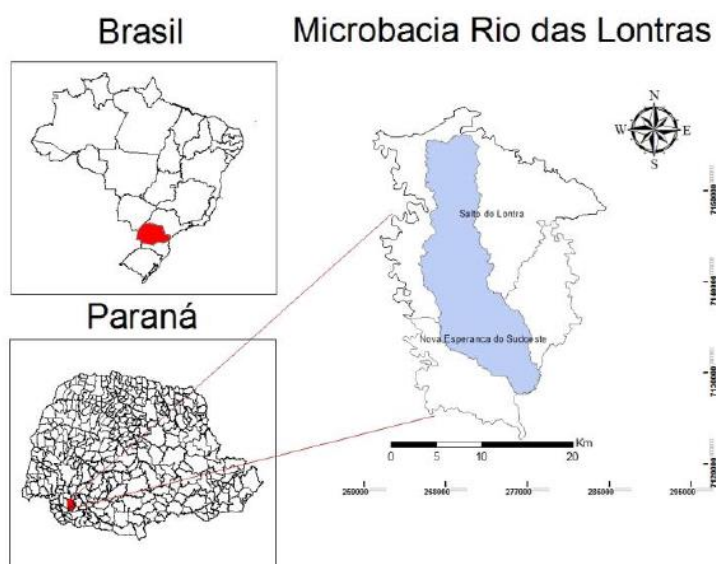


Figura 1 - Mapa de localização da microbacia do Rio das Lontras. *Datum* WGS 84, coordenadas UTM, zona 22S.

O clima da região é caracterizado como Clima Subtropical Úmido (Cfa), com precipitação média de 1900 mm, e a evapotranspiração anual (ET_o) de aproximadamente 1000 mm, com temperatura média de 18.5 C (CAVIGLIONE et al., 2000).

Os dados das medições meteorológicas foram obtidos gratuitamente da estação automática do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) situada nas coordenadas $25^{\circ}41'41''S$ $53^{\circ}5'41''W$ com altitude de 520 m, localizada cerca de 20 km da microbacia do rio das Lontras.

2.2 Dados orbitais

A estimativa da ET_r foi realizada a partir de imagens geradas pelo sensor espectral OLI (Operational Land Imager), que se encontra a bordo do satélite Landsat 8, o qual capta

imagens que possuem resolução espacial de 30 m para as bandas refletivas 1 a 7 e 100 m nas bandas termais 10 e 11, e a banda pancromática 8 com resolução de 15 m. (NASA, 2014).

O processamento das imagens foi executado com o software ENVI 5.0 com auxílio da ferramenta Band Math e para fusão de imagens com a banda pancromática 8, com finalidade de proporcionar uma melhor distinção entre os alvos terrestres, foi utilizado o software ArcGis versão 10.1

2.3 Implementação do algoritmo SEBAL

O algoritmo SEBAL calcula a evapotranspiração horária a partir do fluxo de calor latente, este sendo estimado como resíduo do balanço de energia, (Allen et al., 2002) na superfície conforme Equação 1.

$$LE = R_n - G - H \tag{1}$$

Em que: LE é fluxo de calor latente, $W m^{-2}$, R_n é balanço de radiação na superfície, $W m^{-2}$, G é fluxo de calor no solo, $W m^{-2}$, e H é o fluxo de calor sensível, $W m^{-2}$.

Por seguinte, explicitam-se os procedimentos principais do algoritmo SEBAL, detalhando-se somente as etapas necessárias à análise dos resultados. Para descrição completa, pode ser consultado o trabalho de Bastiaanssen et al. (1998).

2.3.1 Saldo de Radiação (Rn)

Para o saldo de radiação (R_n), o qual representa a radiação disponível à superfície, são considerados tanto a radiação de onda longa quanto a radiação de onda curta. Um fluxograma do processo é mostrado na Figura 2.

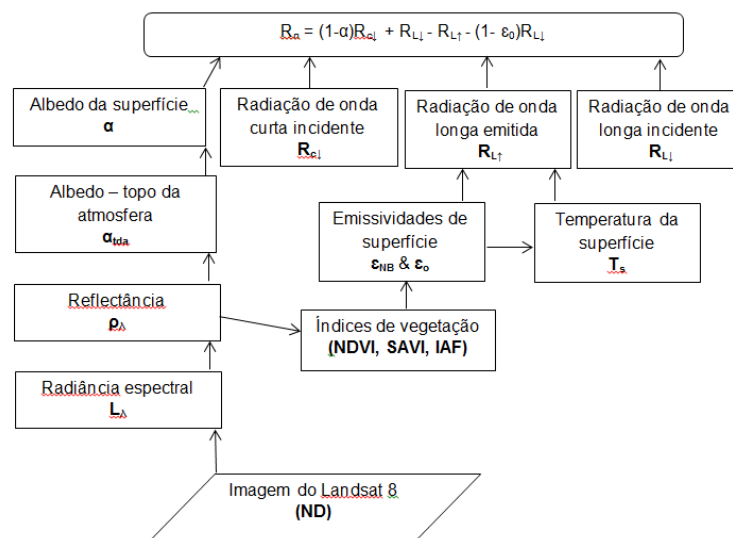


Figura 2. Fluxograma da metodologia de cálculo do saldo de radiação. Fonte: (Allen et al.,2002)

2.3.2 Fluxo de radiação no solo (G)

Utilizando a equação empírica apresentada por Bastiaanssen (2000), o fluxo de calor no solo ($W.m^{-2}$) pode ser obtido, representando valores próximos ao meio-dia de acordo com a Equação 2:

$$G = \left[\frac{T_s}{\alpha} (0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2) (1 - 0,98NDVI^4) \right] R_n \tag{2}$$

Em que: T_s é a temperatura de superfície ($^{\circ}\text{C}$), α é o albedo da superfície (adimensional), NDVI representa o índice de vegetação por diferença normalizada (adimensional) e R_n é o saldo de radiação ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$).

2.3.3 Fluxo de calor sensível (H)

A estimativa deste fluxo é feita baseada na velocidade do vento, rugosidade e temperatura da superfície usando uma calibração interna da diferença da temperatura entre dois níveis próximos à superfície conforme Equação 3:

$$H = \frac{\rho C_p dT}{r_{ah}} \quad (3)$$

Em que: ρ é a densidade do ar úmido ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) C_p é o calor específico do ar à pressão constante ($1004 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$), dT é a diferença de temperatura (K) entre dois níveis e r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$).

A equação apresenta dificuldade em sua resolução, uma vez que há duas incógnitas r_{ah} e dT . Para facilitar esse cálculo, são escolhidos dois pixels denominados âncora (quente e frio) escolhidos a partir das imagens de temperatura de superfície (T_s). Para o pixel quente, admite-se fluxo de calor latente nulo ($LE=0$), enquanto para o pixel frio não há fluxo de calor sensível ($H=0$). A escolha destes pixels auxiliam na determinação da resistência aerodinâmica r_{ah} e a variação da temperatura (dT). O fluxograma do processo iterativo para a estimativa do fluxo de calor sensível (H) está na Figura 3

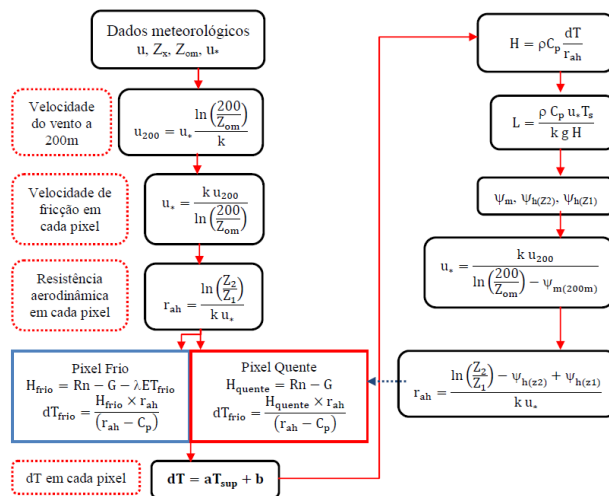


Figura 3. Fluxograma do processo iterativo para estimativa do fluxo de calor sensível (H).

2.3.4 Fluxo de calor latente (LE)

O SEBAL estima o fluxo de calor latente com o método residual da equação do balanço de energia. Portanto, uma vez obtidos os fluxos de calor sensível, no solo e o saldo de radiação, o calor latente pode ser obtido pela Equação 1.

2.3.5 Evapotranspiração diária

Para a obtenção da evapotranspiração diária (ET_{24h}), primeiramente calcula-se a evapotranspiração horária ET_h , dada pela razão entre fluxo de calor latente, e o calor latente de vaporização da água, e para conversão do valor instantâneo para valor horário, multiplica-se a razão anteriormente citada por 3600, conforme Equação 4 (ALLEN et al., 2002):

$$ET_h = 3600 \frac{LE}{\lambda} \quad (4)$$

O passo seguinte é a obtenção da fração de evapotranspiração de referência horária, $FET_{0,h}$, $ET_{0,h}$ é calculada pelo método da FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998), com dados da estação meteorológica utilizada conforme Equação 5:

$$FET_{0,h} = \frac{ET_h}{ET_{0,h}} \quad (5)$$

Considerando o valor da $FET_{0,h} = FET_{0,24}$, uma vez que de acordo com (Allen et al., 2002) o comportamento de $FET_{0,h}$ é relativamente constante em todo o período diurno. Logo, a ET_r diária é dada pela Equação 6:

$$ET_r = FET_{0,h} ET_{0,24} \quad (6)$$

Em que: ET_r é a evapotranspiração real diária (mm.dia^{-1}), $FET_{0,h}$ é a fração de evapotranspiração real diária e $ET_{0,24}$ é a evapotranspiração de referência diária, calculada com metodologia similar à da $ET_{0,h}$.

3. Resultados e Discussão

Os resultados de maior importância do algoritmo SEBAL correspondentes aos componentes do balanço de energia R_n , H , LE e G , foram analisados por meio dos mapas e tabelas com informações estatísticas extraídas de amostras contendo os denominados pixels puros dos usos de cobertura do solo: corpos hídricos, mata nativa, solo exposto, pastagem, agricultura e área urbana. Para as áreas de agricultura foram considerados alvos contendo soja e milho presentes na época da imagem.

A Tabela 1 contém a análise estatística com os valores máximos, mínimos, média e coeficiente de variação (CV) para os fluxos de energia de saldo de radiação, fluxo de calor no solo, fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente e a Figura 4 mostra os mapas para os parâmetros descritos na bacia do rio das Lontras para o dia juliano 259.

Tabela 1. Análise estatística dos fluxos de radiação para a bacia do rio das Lontras.

		Corpos hídricos	Mata nativa	Solo exposto	Pastagem	Agricultura	Área urbana
R_n	Mín (W.m^{-2})	605	617	491	551	602	478
	Máx (W.m^{-2})	654	636	548	622	614	574
	Média (W.m^{-2})	630	626	532	585	611	546
	CV (%)	2	1	3	4	1	4
G	Mín (W.m^{-2})	36	38	64	50	50	64
	Máx (W.m^{-2})	60	41	68	60	52	66
	Média (W.m^{-2})	55	40	67	55	51	65
	CV (%)	10	2	2	5	1	1
H	Mín (W.m^{-2})	116	71	529	198	211	347
	Máx (W.m^{-2})	299	132	574	362	299	396
	Média (W.m^{-2})	199	91	544	287	254	367
	CV (%)	27	19	2	18	7	4
LE	Mín (W.m^{-2})	262	456	4	130	252	66
	Máx (W.m^{-2})	490	520	64	362	352	159
	Média (W.m^{-2})	376	495	25	244	307	114
	CV (%)	18	4	7	29	6	17

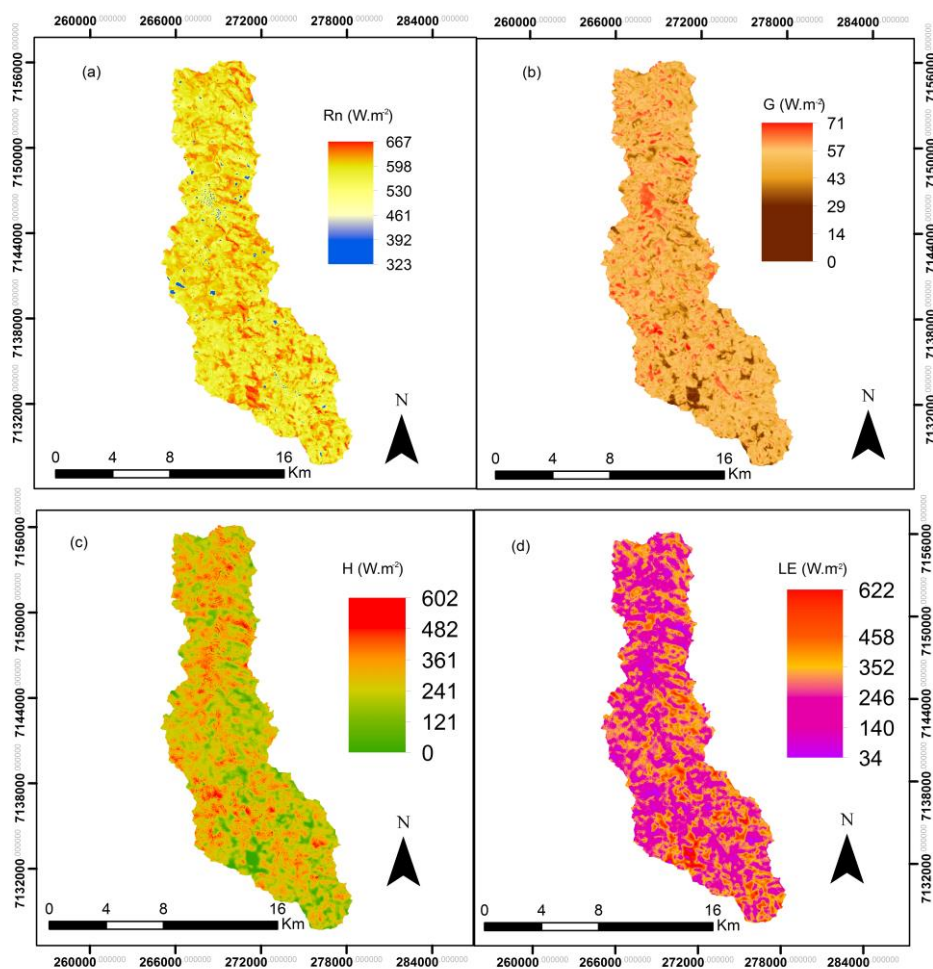


Figura 4- (a) Saldo de Radiação (R_n); (b) Fluxo de calor no solo (G); Fluxo de calor sensível (H); (d) Fluxo de calor latente (LE) na bacia do rio das Lontras.

Para o fluxo R_n , observa-se de acordo com a Tabela 1 que os valores com maiores médias concentraram-se nas áreas de corpos hídricos (630 W.m^{-2}), seguido da classe de mata nativa (626 W.m^{-2}), (Como estas áreas apresentam baixos valores de albedo, resulta em menor reflexão de ondas curtas e, por conta disso, ocorre menor emissão de ondas longas, favorecendo os valores de R_n). As menores médias estão localizadas em regiões de maior atividade antrópica, como área urbana dos municípios de Salto do Lontra e Nova Esperança do Sudoeste (546 W.m^{-2}) e solo exposto (532 W.m^{-2}), regiões com maior perda energética por reflexão e emissão. Leivas et al. (2007) encontraram valores com comportamentos semelhantes com as maiores médias em corpos hídricos (662 W.m^{-2}), seguido de áreas vegetadas (600 W.m^{-2}) e área de solo exposto com as menores (585 W.m^{-2}). Com relação aos valores de LE , os maiores valores médios foram encontrados para mata nativa (495 W.m^{-2}), seguido de corpos hídricos e agricultura (376 e 307 W.m^{-2} respectivamente). Para o fluxo de calor latente, de acordo com a metodologia descrita em Allen et al., (2002), se espera que os maiores valores se encontrem em corpos hídricos, entretanto, devido à pequena largura dos rios na bacia em estudo, os *pixels* referentes a esta classe acabam tendo seus valores misturados aos de outras classes adjacentes com menores fluxos de calor latente, o que pode explicar os resultados atípicos.

Para o fluxo de calor no solo, os menores valores estão relacionados com locais de maior densidade de vegetação e com menor temperatura da superfície e albedo como pode ser visualizado na Figura 4 (b) com tonalidade marrom variando até alaranjado, correspondendo

as áreas de mata nativa, agricultura e pastagem, com médias para G de 40, 51 e 55 $W.m^{-2}$, respectivamente. Enquanto os maiores valores para a média foram para solo exposto (67 $W.m^{-2}$) e área urbana (65 $W.m^{-2}$), representado em tonalidade quente (vermelha). Os resultados estão próximos aos encontrados por Uda et al. (2013), utilizando imagens ASTER, os quais ficaram 66 $W.m^{-2}$ para área urbana e 63 $W.m^{-2}$ para solo exposto.

Para os valores instantâneos de H, valores inferiores a 241 $W.m^{-2}$ estão representados pela coloração verde. Observa-se que estes valores concentram-se principalmente sobre áreas de mata nativas. Para *pixels* com valores de H próximos a zero correspondem aos locais contendo massa de água. É possível ainda perceber para regiões urbanas, apresentaram valores de calor sensível com média de 367 $W.m^{-2}$, valores semelhantes ao encontrado por Nicácio (2008) no município de Petrolina.

Na Tabela 2 e Figura 5 estão os resultados da análise estatística e distribuição espacial da evapotranspiração real diária (ETr) para a bacia do rio das Lontras.

Tabela 2. Evapotranspiração real diária (ETr) na bacia do rio das Lontras no dia juliano 259.

Classe	ETr			
	Mín (mm.dia ⁻¹)	Máx (mm.dia ⁻¹)	Média (mm.dia ⁻¹)	Cv (%)
Corpos hídricos	3,50	6,54	5,01	18,28
Mata nativa	6,07	6,93	6,60	3,51
Solo exposto	0,05	0,86	0,34	25,22
Pastagem	1,73	4,82	3,25	29,33
Agricultura	3,36	4,69	4,09	6,18
Área Urbana	0,89	2,12	1,52	17,07

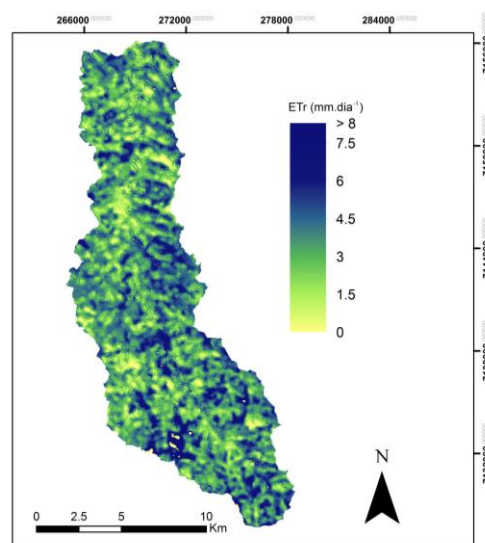


Figura 5. Evapotranspiração real diária da bacia do rio das Lontras

Observa-se que os menores valores de evapotranspiração estão em áreas de maior interferência antrópica, como área urbanizada e solo exposto com médias de 1,52 e 0,34 $mm.dia^{-1}$ respectivamente. Na Figura 5 estas áreas estão representadas em tons de amarelo e verde. Áreas de pastagens, agricultura e corpos hídricos apresentaram valores intermediários de ETr com médias de 3,25, 4,09 e 5,01 $mm.dia^{-1}$, respectivamente. A maior média encontrada foi para mata nativa (6,07 $mm.dia^{-1}$), e assim como era esperado para o fluxo de calor latente, os maiores valores são esperados em corpos hídricos, a razão por este resultado tem mesma explicação mencionada acima para o fluxo LE.

Além disso, o coeficiente de variação obtido para pastagem e solo exposto foram os maiores dentre as classes analisadas, e pode ser explicado devido aos talhões da bacia apresentarem culturas com diferentes estágios vegetativos, portanto, mesmo em locais classificados como solo exposto possivelmente alguma cultura pode estar em desenvolvimento.

4. Conclusões

O algoritmo SEBAL estimou satisfatoriamente a ETr quando comparados com resultados de outras pesquisas com dados observados à superfície. Os resultados demonstram que o SEBAL pode ser utilizado não somente para estimativa da evapotranspiração, mas os produtos gerados podem ser utilizados no acompanhamento de áreas degradadas.

Agradecimentos

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo financeiro.

Referências

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes D.; Smith, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. p. 1–15, 1998.
- Allen, R. G.; Tasumi, M.; Trezza, R. Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) - Advanced training and users Manual. p 1–98. Idaho, 2002.
- Allen, R. G.; Tasumi, M., Morse, A.; Trezza, R.; Wright, J. L.; Bastiaanssen, W.; Robison, C. W. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration(METRIC... — Applications. **Journal of Hydrology**, v. 133, n. 4, p. 395–406, 2007.
- Bastiaanssen, W. G. M.; Menenti M.; Feddes R. A; Holtslag A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). **Journal of Hydrology**, v. 213, p. 198–212, 1998.
- 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.
- Caviglione, J. H.; Kiihl, L. R. B.; Caramori, P. H.; Oliveira, D. Cartas climáticas do paraná. Londrina : IAPAR, 2000.
- Leivas, J.; Gusso, A.; Fontana, D. C.; Berlato, M. Estimativa do balanço de radiação na superfície a partir de imagens do sensor ASTER. In:Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto(SBSR),13..2007, Florianópolis. **Anais**. Disponível em CD-ROM. 2007
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). Landsat Data Continuity Mission: Continuously Observing Your World. 2014. Disponível em: <http://ldcm.gsfc.nasa.gov/mission_details.html>. Acesso em: 03 março de 2014.
- Nicácio, R. M. **Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do rio São Francisco**. 2008. 337 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Combra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Rio de Janeiro, RJ, 2008.
- Moreira, L. C. J.; Durand, B. J.; Teixeira, A. dos S.; Andrade, E. M. Variabilidade local e regional da evapotranspiração estimada pelo algoritmo SEBAL. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 6, p. 1148–1159, 2010.
- Teixeira, A. H. D. C.; Bastiaanssen, W. G. M.; Moura, M. S. B.; Soares, J. M.; Ahmad, M. D.; Bos, M. G. Energy and water balance measurements for water productivity analysis in irrigated mango trees , Northeast Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 1524–1537, 2008.
- Uda P. K.; Corseuil C. W.; Kobiyama M.; Silva F. V. Análise da evapotranspiração real diária para diferentes usos e coberturas do solo da bacia do rio Negrinho – SC por meio do modelo SEBAL e imagens ASTER. In:Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto(SBSR),16..2013, Foz do Iguaçu. **Anais**. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p1053.pdf>> Acesso em: 01 out. 2014.