

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO NO MAPEAMENTO DOS FLUXOS DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE ÁREAS IRRIGADAS NO TRIÂNGULO MINEIRO

*Evaldo de Paiva Lima¹; Gilberto Chohaku Sedyama²; Rafael Coll Delgado³;
Silvio Bueno Pereira⁴ & Ricardo Guimarães Andrade⁵*

RESUMO --- As técnicas de sensoriamento remoto vem se destacando nos últimos anos no mapeamento dos fluxos de energia e evapotranspiração (ET) em escala local, regional e global. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo mapear os fluxos de energia e a ET de áreas irrigadas no Triângulo Mineiro no dia 16 de agosto de 2008 por meio do *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL). O *Reference Evapotranspiration Calculator* (REF-ET) foi utilizado para calcular a evapotranspiração de referência, pelo método de Penman-Monteith FAO (PM-FAO), para comparar com o resultado obtido pelo SEBAL. A ET estimada pelo SEBAL variou de 0,00 a 8,98 mm/dia, com média de 3,25 mm/dia. O resultado encontrado pelo método de PM-FAO foi de 5,49 mm/dia, enquanto que o estimado pelo SEBAL, no *pixel* em que se encontra a estação meteorológica, foi de 4,34 mm/dia.

ABSTRACT --- The use of remote sensing techniques in mapping the energy flows and evapotranspiration (ET) on local, regional and global has increased over recent years. This study aimed to map the energy flows and ET in irrigated areas in Triângulo Mineiro, Minas Gerais State, on August 16, 2008, by the *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL). *Reference Evapotranspiration Calculator* (REF-ET) was used to calculate the evapotranspiration reference, by FAO Penman-Monteith method (PM-FAO), to compare with the result obtained by SEBAL. ET estimated by SEBAL varied from 0,00 to 8,98 mm/day, with average of 3,25 mm/day. The result found by PM-FAO method was of 5,49 mm/day, while the estimated one for SEBAL, in the pixel where the meteorological station is, was of 4,34 mm/day.

Palavras-chave: Recursos hídricos, evapotranspiração, sensoriamento remoto.

¹ Doutorando em Meteorologia Agrícola da UFV, DEA, Av. P. H. Rolfs s/n, 36570-000 Viçosa. E-mail: lima_evaldo@yahoo.com.br

² Professor Titular da UFV, DEA, Av. P. H. Rolfs s/n, 36570-000 Viçosa. E-mail: g.sedyama@ufv.br

³ Doutorando em Meteorologia Agrícola da UFV, DEA, Av. P. H. Rolfs s/n, 36570-000 Viçosa. E-mail: rcdelgado@hotmail.com

⁴ Professor Adjunto da UFGD, Rodovia Dourados-Itahúm, km 12, Cx. Postal 533, 79804-970 Dourados. E-mail: silviopereira@ufgd.edu.br

⁵ Pesquisador da Embrapa Monitoramento por Satélite, Av. Soldado Passarinho 303, 13070-115 Campinas. E-mail: andradeguimaraes@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

O mapeamento dos fluxos de energia e da evapotranspiração são parâmetros fundamentais, entre outros, em modelagem atmosférica e entendimento dos fenômenos de mudanças climáticas em suas diversas escalas. Segundo Pereira *et al.* (1997) a energia radiante é transformada nos fluxos de calor latente, sensível, no solo e fotoquímico, ou seja, o balanço de radiação à superfície (R_n) é utilizado nos processos de evaporação (λET , calor latente), aquecimento do ar (H , calor sensível), do solo (G , calor no solo), e das plantas (P , calor sensível), e na fotossíntese (F , fotoquímica). Estes autores ainda citam que o processo fotossintético (F) utiliza, em média, menos que 3% do R_n , sendo quantitativamente desprezível. O calor armazenado nas plantas depende do porte da vegetação, e no caso de plantas anuais P também é desprezível; no entanto, para florestas, este termo pode variar entre 3 e 10% do R_n , conforme Moore e Fisch (1986)¹ citado por Pereira *et al.* (1997). Na prática, os principais termos do balanço de energia são:

$$R_n = \lambda ET + H + G \quad (1)$$

O método do balanço de energia é considerado um método racional de medida de evapotranspiração (ET) de uma superfície, o qual mede a energia disponível em um sistema natural e separa as frações utilizadas nos diferentes processos. O conhecimento da evapotranspiração ou fluxo de calor latente de evaporação contribui para uma utilização mais racional da água em uma determinada cultura, onde as fases críticas de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo são limitadas pelo fator hídrico (Cunha *et al.*, 2000).

French *et al.* (2005), baseados em outros autores, citam que a variabilidade espacial da evapotranspiração é grande, e que, até mesmo as maneiras mais avançadas de medi-la, em torres por meio de sistemas de covariância de vórtices turbulentos, não é frequentemente o mais representativo da ET numa escala regional. Conseqüentemente, é necessária a incorporação de dados de sensoriamento remoto, devido esta ser a única maneira de se observar, simultaneamente, grandes áreas de superfície do solo.

O sensoriamento remoto oferece grandes vantagens, como a obtenção de informações que possibilitam a geração de séries temporais da região em estudo, facilitando a comparação entre elas. Ao mesmo tempo, proporciona o oferecimento de ampla cobertura espacial, favorecendo a análise de toda a região e a obtenção de informações que podem ser representadas espacialmente. A

¹ MOORE, C. J.; FISCH, G. (1986). "Estimating heat storage in Amazonian tropical forest". *Agricultural and Forest Meteorology* 38(1-3), pp. 147-168.

principal vantagem de aplicar procedimentos de ET baseados no sensoriamento remoto é que a água consumida pelo sistema solo-água-planta pode ser obtida diretamente sem a necessidade de quantificar complexos processos hidrológicos.

É nesse contexto que entra o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), pois estima a evapotranspiração utilizando o balanço de energia à superfície, ou seja, o fluxo de calor latente é calculado para cada pixel da imagem como um “resíduo” da equação clássica do balanço de energia. Assim, o objetivo deste trabalho foi mapear os fluxos de energia e a ET de áreas irrigadas no Triângulo Mineiro utilizando o algoritmo SEBAL e imagem do Landsat 5 - TM.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo (Figura 1) compreende parte dos municípios de Conceição das Alagoas e Água Comprida (região do Triângulo Mineiro), na divisa do estado de Minas Gerais com São Paulo. A área possui as seguintes coordenadas: canto superior esquerdo (latitude 19° 52' 52,62" Sul e longitude 48° 19' 12,01" Oeste) e canto inferior direito (latitude 20° 11' 01,12" Sul e longitude 47° 59' 03,38" Oeste).

A região possui clima quente e úmido, topografia levemente inclinada a semi-plana com solos latossolos vermelhos e terra roxa estruturada de origem distrófica (http://www.aguacomprida.mg.gov.br/info_municipio.html). Nessa região há o predomínio de cultivos da cana-de-açúcar, soja, milho, sorgo, feijão e arroz. Devido à proximidade com o Rio Grande, a irrigação de culturas é bastante utilizada.

Para o estudo utilizou-se uma imagem do dia 16 de agosto de 2008 do satélite Landsat 5 - TM, na qual não possuía cobertura de nuvens. Esta imagem é composta de sete bandas espectrais e foi obtida gratuitamente junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) por meio do sítio <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>. A resolução espacial é de 30 m nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, e de 120 m na banda 6 (termal). Também foram utilizadas informações meteorológicas (temperatura do ar, umidade relativa, radiação global e velocidade do vento) obtidas numa estação meteorológica automática (A520) pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (latitude 19° 59' 09" Sul, longitude 48° 09' 09" Oeste e 568 m de altitude). Estas informações foram obtidas gratuitamente por meio do sítio <http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/automaticas.php>.

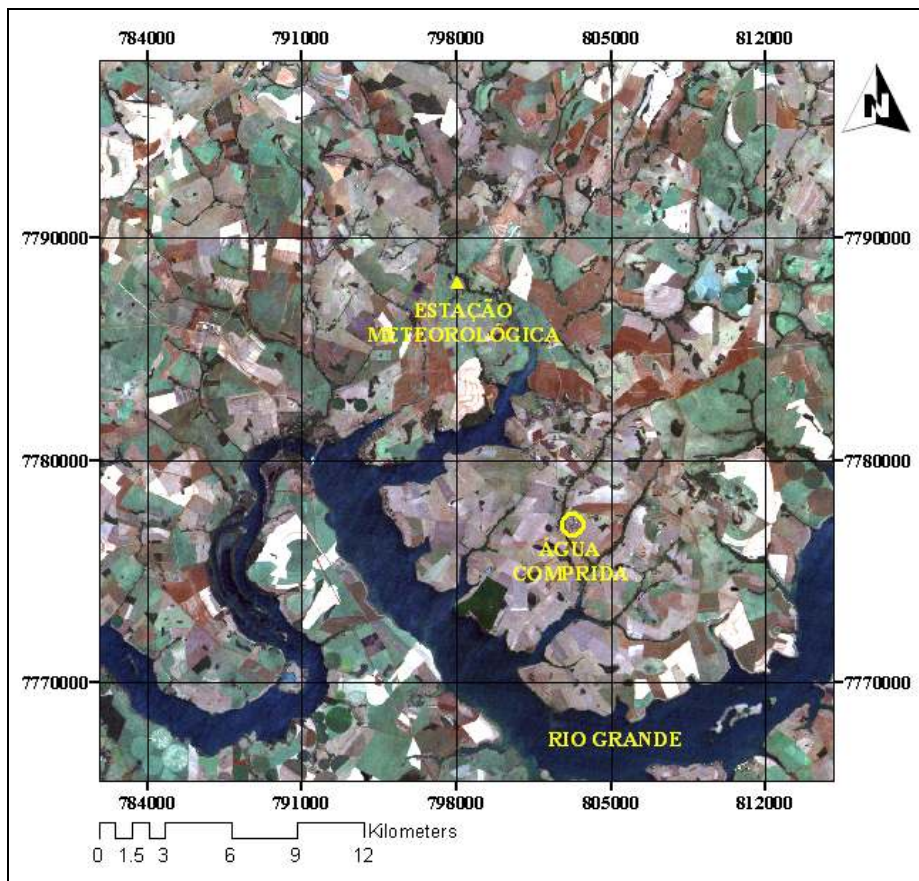


Figura 1 – Imagem na composição RGB (bandas 3, 2 e 1 do Landsat 5 - TM) para o dia 16 de agosto de 2008. O círculo amarelo indica a localização da cidade de Água Comprida, Minas Gerais.

Para obtenção dos componentes do balanço de energia e da evapotranspiração foi utilizado o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), conforme proposto por Bastiaanssen *et al.* (1998). Allen *et al.* (2002) apresentam os procedimentos utilizados na estimativa do balanço de energia e Ayenew (2003) os da estimativa da evapotranspiração. O programa *ArcGis 9.2* foi utilizado adicionalmente para melhor visualizar as informações geradas no SEBAL.

2.1. Balanço de radiação à superfície

A estimativa do balanço de radiação à superfície (R_n) envolvia várias etapas e o processamento destas foi realizado no *Model Maker* do programa *Erdas 9.1*. A Figura 2 apresenta as etapas utilizadas na estimativa do balanço de radiação.

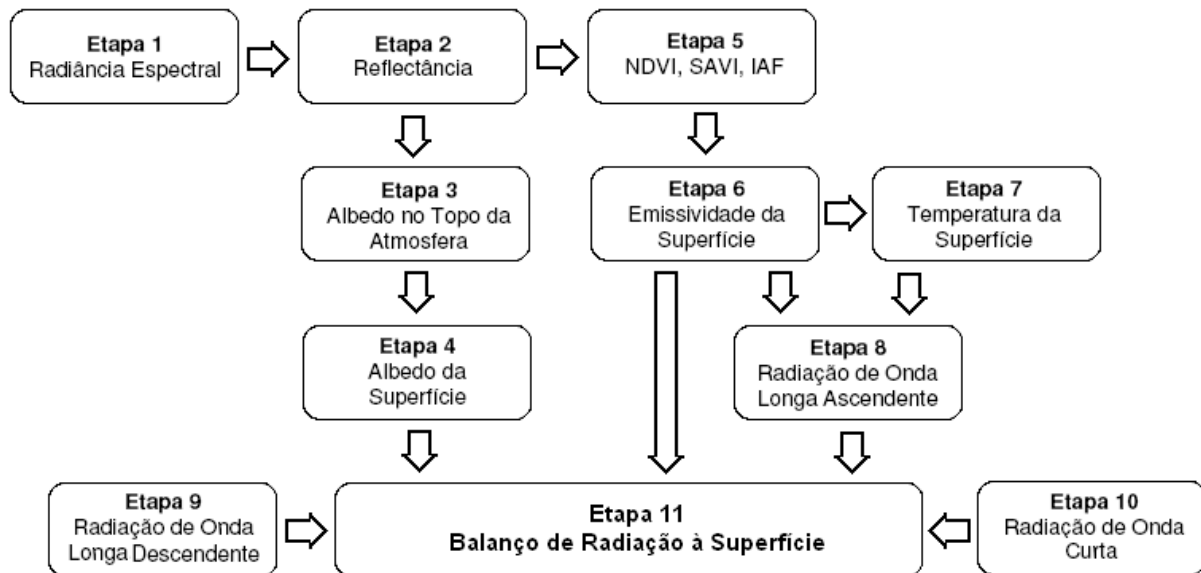


Figura 2 – Fluxograma das etapas utilizadas na estimativa do balanço de radiação à superfície.

Fonte: adaptado de Allen *et al.* (2002).

O balanço de radiação à superfície contabiliza a energia radiante disponível e é função dos componentes que chegam e saem da superfície do solo. Este termo foi obtido por meio da seguinte expressão:

$$Rn = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_o) R_{L\downarrow} \quad (2)$$

em que, $R_{s\downarrow}$ é a radiação de onda curta incidente em cada pixel (W/m^2), α é o albedo corrigido de cada pixel (adimensional), $R_{L\downarrow}$ é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção do pixel (W/m^2), $R_{L\uparrow}$ é a radiação de onda longa emitida por cada pixel (W/m^2) e ε_o é a emissividade de cada pixel da imagem (adimensional).

A radiação de onda curta incidente ($R_{s\downarrow}$) foi calculada utilizando a constante solar, o ângulo zenital, a distância relativa terra-sol e a transmissividade atmosférica. Para o albedo foram necessários o albedo no topo da atmosfera (α_{toa}), a radiação solar refletida pela atmosfera (α_p) e a transmissividade atmosférica. Para o cálculo da radiação de onda longa emitida pela atmosfera ($R_{L\downarrow}$) utilizou-se a emissividade atmosférica (ε_a), a constante de Stefan-Boltzmann e a temperatura do ar obtida na estação automática (A520), pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia, no momento da passagem do satélite. A radiação de onda longa emitida ($R_{L\uparrow}$) foi calculada utilizando

a emissividade da banda termal com intervalo espectral variando de 6 a 14 μm (ε_o), a constante de Stefan-Boltzmann e a temperatura da superfície.

2.2. Fluxo de calor no solo

O fluxo de calor no solo (G) para cada *pixel* foi estimado por meio da equação:

$$G = \left[\frac{T_s}{\alpha} (0,0038 \alpha + 0,0074 \alpha^2) (1 - 0,98 \text{NDVI}^4) \right] R_n \quad (3)$$

em que, T_s é a temperatura da superfície ($^{\circ}\text{C}$) e NDVI é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*). Para efeito de correção dos valores do fluxo de calor no solo para corpos de água ($\text{NDVI} < 0$), considera-se $G = 0,3R_n$ (Silva e Bezerra, 2006).

2.3. Fluxo de calor sensível

O fluxo de calor sensível (H) é a taxa de calor transferido da superfície para o ar pelos processos de convecção e condução. Este fluxo é calculado utilizando a velocidade do vento, a resistência aerodinâmica e diferenças da temperatura do ar entre a superfície e o ar próximo à mesma.

$$H = \frac{\rho c_p dT}{r_{ah}} \quad (4)$$

em que, ρ é a densidade do ar úmido ($1,15 \text{ kg m}^{-3}$), c_p é o calor específico do ar à pressão constante ($1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), dT é a diferença de temperatura entre dois níveis e r_{ah} é a resistência aerodinâmica (sm^{-1}).

Para calcular o H precisa-se definir a diferença da temperatura (dT) próxima a superfície. O SEBAL calcula dT para cada *pixel* por meio de uma relação linear entre dT e T_s . Esta relação é dada pelos coeficientes a e b que são obtidos pelos *pixels* denominados “âncoras”. Estes *pixels* também chamados de “quente” e “frio” ficaram situados na área de estudo. O *pixel* “frio” foi selecionado numa área de pivô central (latitude $20^{\circ} 01' 52,75''$ Sul e longitude $48^{\circ} 12' 07,65''$

Oeste). A temperatura da superfície e a temperatura do ar próxima à superfície foram consideradas iguais para esse pixel. Nesse caso assumiu-se que o fluxo de calor sensível é igual à zero, e então, determinou-se o fluxo de calor latente máximo. O pixel “quente” foi selecionado em um campo agrícola com solo exposto (latitude 20° 00’ 36,00” Sul e longitude 48° 09’ 16,21” Oeste), onde assumiu-se que o fluxo de calor latente é igual à zero, e então, obteve-se o fluxo de calor sensível máximo. A Figura 3 apresenta o fluxograma das etapas utilizadas na estimativa do fluxo de calor sensível.

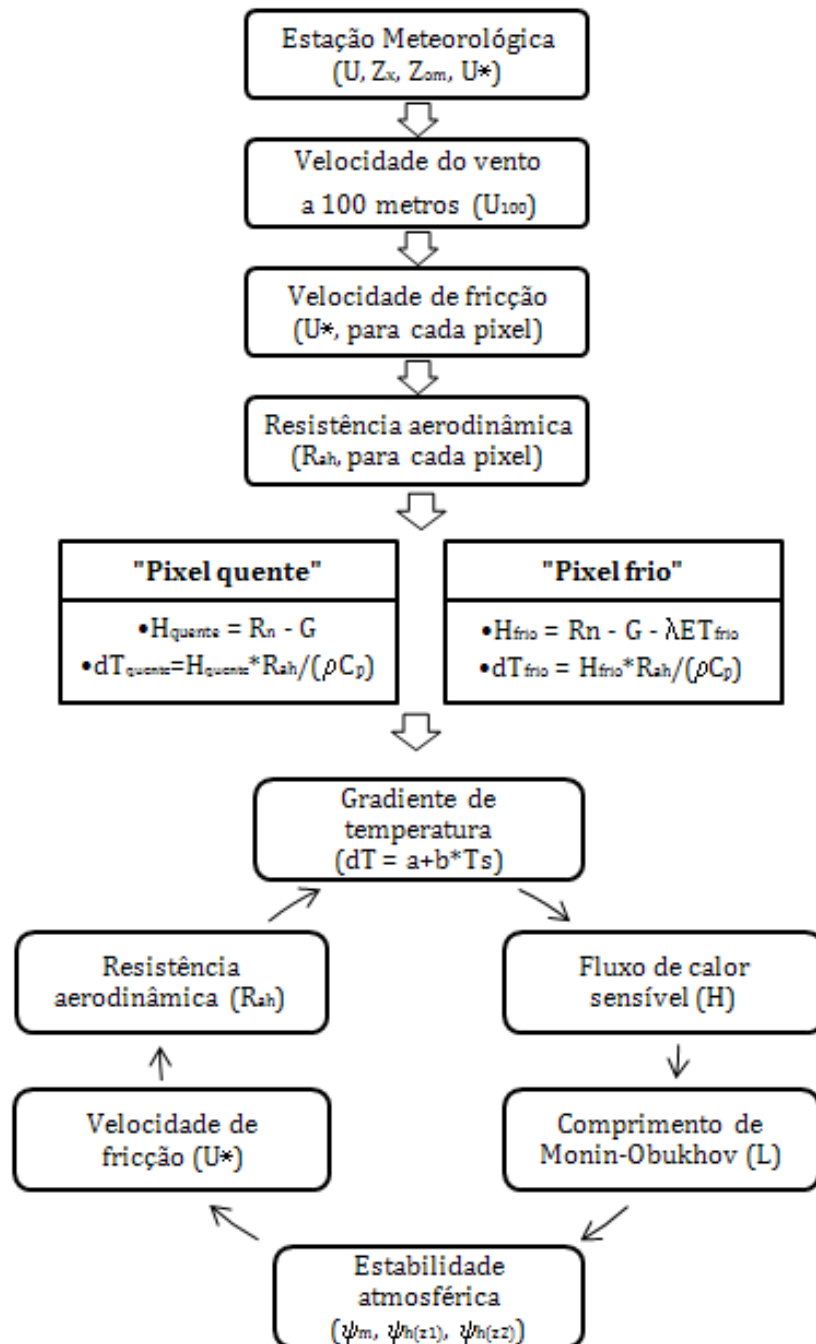


Figura 3 – Fluxograma das etapas utilizadas na estimativa do fluxo de calor sensível.

Fonte: Ruhoff *et al.* (2008).

2.4. Fluxo de calor latente

O fluxo de calor latente (λET) foi obtido pela simples diferença dos fluxos de calor no solo e sensível do balanço de radiação à superfície:

$$\lambda ET = Rn - G - H \quad (5)$$

2.5. Evapotranspiração

A evapotranspiração diária ($ET_{diária}$) foi estimada a partir da metodologia utilizada por Ayenew (2003).

$$ET_{diária} = \frac{\Lambda \cdot Rn_{diário}}{28} \quad (6)$$

em que, Λ é a fração evaporativa (adimensional), $Rn_{diário}$ é o balanço de radiação integrado para um período de 24 horas e o escalar no denominador (28) é o fator de conversão de W/m^2 para mm/dia .

A fração evaporativa é dada pela seguinte relação:

$$\Lambda = \frac{\lambda ET}{\lambda ET + H} = \frac{\lambda ET}{Rn - G} \quad (7)$$

A fração evaporativa é definida como a fração de calor latente para o máximo saldo de energia disponível (Chemin *et al.*, 2004). Estudos micrometeorológicos indicam que esse termo pode ser considerado constante durante o período diurno, sendo que é neste período que acontece o processo de evapotranspiração (Crago, 1996; Ayenew, 2003).

Para a estimativa do $Rn_{diário}$ utilizou-se os dados de temperatura do ar, umidade relativa e radiação global coletados na estação A520.

O *Reference Evapotranspiration Calculator* (REF-ET), descrito por Allen (2000), foi utilizado para calcular a evapotranspiração de referência (ET_o) diária, pelo método de Penman-Monteith FAO (1998), com os dados registrados na estação. O objetivo deste cálculo foi comparar o resultado encontrado com a evapotranspiração obtida por meio do SEBAL.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Balanço de radiação à superfície

O balanço de radiação à superfície exerce um papel fundamental nos métodos que estimam a evapotranspiração, componente essencial do balanço hídrico, principalmente quando a superfície do solo é mantida úmida com irrigação, que devido às condições favoráveis de plantio (relevo levemente inclinado, água abundante, fertilidade do solo, etc.) é o caso de muitas áreas no Triângulo Mineiro.

A Figura 4 apresenta o balanço de radiação para a região de abrangência dos municípios de Conceição das Alagoas e Água Comprida no dia 16 de agosto de 2008. A tonalidade verde escura corresponde ao intervalo de menores valores do R_n , $307,46 \text{ W/m}^2$ a $434,97 \text{ W/m}^2$, localizada sobre áreas de solo exposto. O maior intervalo de valores do R_n , $600,06 \text{ W/m}^2$ a $649,72 \text{ W/m}^2$, correspondem à tonalidade vermelha e localiza-se principalmente sobre o Rio Grande, que fica na divisa entre o estado de Minas Gerais e São Paulo. As demais tonalidades representam os valores intermediários do balanço de radiação, sendo que o valor médio foi de $529,64 \text{ W/m}^2$ (representado pela tonalidade de laranja claro).

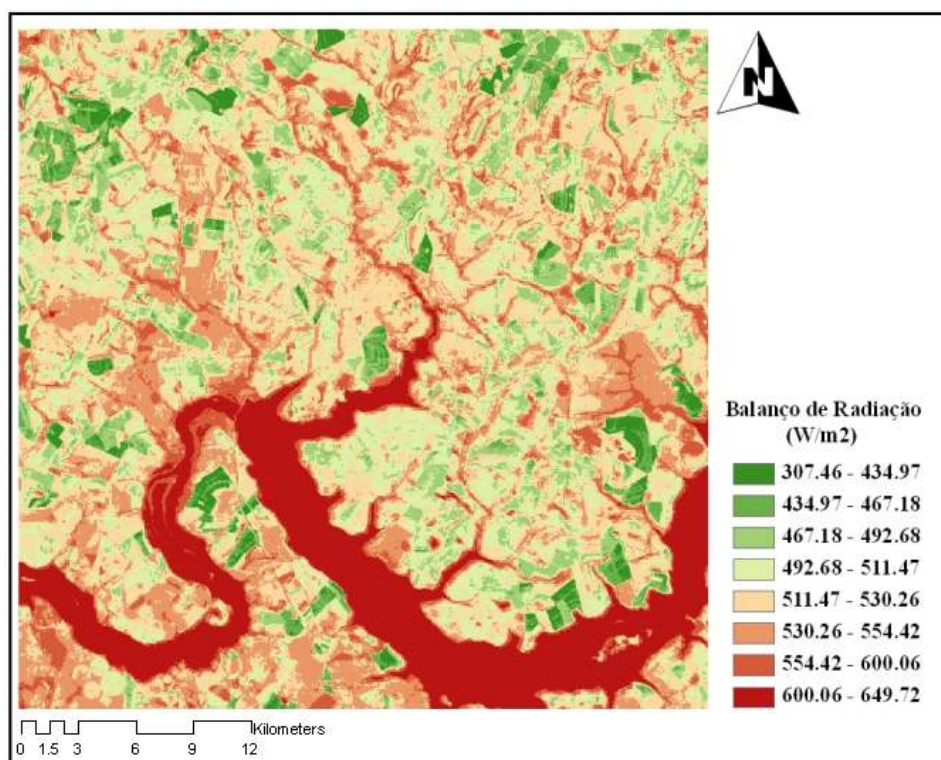


Figura 4 – Balanço de radiação à superfície do dia 16/08/2008 para a região que abrange os municípios de Conceição das Alagoas e Água Comprida, no Triângulo Mineiro, Minas Gerais.

Andrade (2008) ao analisar 22 imagens Landsat 5 – TM dos anos de 2004 a 2007 nos limites territoriais da Fazenda Boa Fé, município de Conquista, Triângulo Mineiro, Minas Gerais, encontrou R_n médio de $711,82 \text{ W/m}^2$, sendo que, em média o R_n mínimo e máximo da série de 22 imagens analisadas foi de $628,76 \text{ W/m}^2$ e $889,59 \text{ W/m}^2$, respectivamente. Em áreas vegetadas pela cultura da cana-de-açúcar, Andrade (2008) obteve R_n inferior a 650 W/m^2 nos dias 14/06/2005, 17/06/2006, 03/07/2006 e 19/07/2006 (meses em que o clima é seco e frio), no entanto, nos dias 22/02/2005, 11/04/2005, 24/01/2006, 14/04/2006 e 17/04/2007 (meses em que o clima é quente e chuvoso) o R_n apresentou valores acima de 800 W/m^2 . Contudo, a porcentagem de cobertura da terra pela cultura da cana-de-açúcar exerceu forte influência nos valores de R_n encontrados (Andrade, 2008).

Silva *et al.* (2005) utilizando duas imagens do satélite Landsat 5 - TM obtidas em 04/12/2000 e 04/10/2001, que envolviam áreas irrigadas do Projeto Senador Nilo Coelho, parte do Lago de Sobradinho, áreas de vegetação nativa e parte da área urbana dos municípios de Petrolina-PE e Juazeiro-BA, encontraram os maiores valores do R_n sobre o Lago de Sobradinho ($751,30 \text{ W/m}^2$ e $750,7 \text{ W/m}^2$, respectivamente) e os menores sobre área de solo exposto ($426,90 \text{ W/m}^2$ e $421,8 \text{ W/m}^2$, respectivamente). Silva *et al.* (2005) ainda citam que os valores médios do balanço de radiação foram $615,05 \text{ W/m}^2$ e $583,96 \text{ W/m}^2$ para as datas de 04/12/2000 e 04/10/2001, respectivamente. A tendência de maiores valores do R_n sobre superfícies líquidas e menores sobre os demais tipos de superfícies, encontrada por Silva *et al.* (2005) para o Nordeste Brasileiro, coincide com os resultados encontrados para o dia 16 de agosto de 2008 no Triângulo Mineiro. Esse comportamento pode ser explicado pelo efeito combinado do albedo (α) e da temperatura da superfície (T_s), pois o primeiro termo influencia o balanço de ondas curtas e o segundo o balanço de ondas longas. Um menor albedo, caso observado sobre o Rio Grande, favorece uma menor reflexão da $R_{s\downarrow}$ e isso contribui para que o balanço de ondas curtas seja maior, quando comparado com uma superfície de maior reflexão (maior albedo). Enquanto que, uma menor T_s , caso observado novamente sobre o Rio Grande, favorecerá para que o balanço de ondas longas seja menor (em termos de valor) quando comparado a superfícies com maiores temperaturas. Assim, um menor valor do α e da T_s favorecem para que o R_n seja maior sobre superfícies líquidas.

Folhes *et al.* (2007) obtiveram em áreas sobre o curso do Rio São Francisco, próximo à cidade de Petrolina-PE, R_n entre 360 W/m^2 e 810 W/m^2 para uma imagem do dia 12 de outubro de 2004. No entanto, para a área do projeto de irrigação Jaguaribe-Apodi, situado nas proximidades do limite entre os estados do Ceará e Rio Grande do Norte, Folhes (2007) encontrou R_n médio de 629

W/m^2 , $586 W/m^2$, $551 W/m^2$ e $561 W/m^2$ para imagens dos dias 24/10/2005, 28/01/2006, 23/07/2006 e 08/08/2006, respectivamente.

3.2. Fluxo de calor no solo

O fluxo de calor no solo é a quantidade de energia utilizada para aquecer o solo. Este fluxo pode ser medido por meio de sensores ou estimado empiricamente, podendo ser função de índices de vegetação, temperatura e albedo da superfície.

A Figura 5 apresenta os valores de G para o dia 16 de agosto de 2008. O fluxo de calor no solo variou de $1,03 W/m^2$ a $194,91 W/m^2$, com um valor médio de $75,88 W/m^2$ (tonalidade mais clara de verde). A tonalidade verde escura corresponde ao intervalo de menores valores, $1,03$ a $48,17 W/m^2$, e a tonalidade de vermelho, encontrada principalmente sobre o Rio Grande, corresponde ao intervalo de maiores valores ($187,31 W/m^2$ a $194,91 W/m^2$).

Andrade (2008) ao analisar 22 imagens (anos de 2004 a 2007) Landsat 5 – TM, dentro dos limites territoriais da Fazenda Boa Fé, Conquista, MG, obteve G médio de $81,91 W/m^2$, sendo que em média o G mínimo e máximo foi de $45,66 W/m^2$ e $269,47 W/m^2$, respectivamente. Os valores máximos de G foram localizados em áreas construídas da Fazenda Boa Fé (telhados de galpões, sede da fazenda, asfalto, silos, etc). Já os valores mínimos de G ocorreram em áreas variadas da cobertura da terra de acordo com o mês e ano analisado, sendo que, em todas as cenas analisadas por Andrade (2008) a menor classe de G na data analisada estava abrangendo áreas de preservação (mata nativa e várzeas).

Em áreas de solo exposto, Andrade (2008) encontrou G entre $50 W/m^2$ e $100 W/m^2$. Já em duas pequenas represas da Fazenda Boa Fé, encontrou valores de G oscilando entre $150 W/m^2$ e $300 W/m^2$ de acordo com o ano e o mês analisado. Em áreas de cobertura da terra pela cultura da cana-de-açúcar, Andrade (2008) obteve valores de G inferiores a $250 W/m^2$, no entanto, nas cenas do dia 04/06/2007 e 20/06/2007 as áreas sob plantio da cana-de-açúcar apresentaram valores de G inferiores a $50 W/m^2$.

Silva e Bezerra (2006) utilizando duas imagens do satélite Landsat 5 - TM obtidas em 04/12/2000 e 04/10/2001, que envolviam áreas irrigadas do Projeto Senador Nilo Coelho, parte do Lago de Sobradinho, áreas de vegetação nativa e parte da área urbana dos municípios de Petrolina-PE e Juazeiro-BA, também encontraram os maiores valores de G sobre superfície líquida (Lago de Sobradinho), $211,80 W/m^2$ e $214,50 W/m^2$, respectivamente. Silva e Bezerra (2006) ainda citam que os valores médios do fluxo de calor no solo foram $94,50 W/m^2$ e $112,30 W/m^2$ para as datas de 04/12/2000 e 04/10/2001, respectivamente.

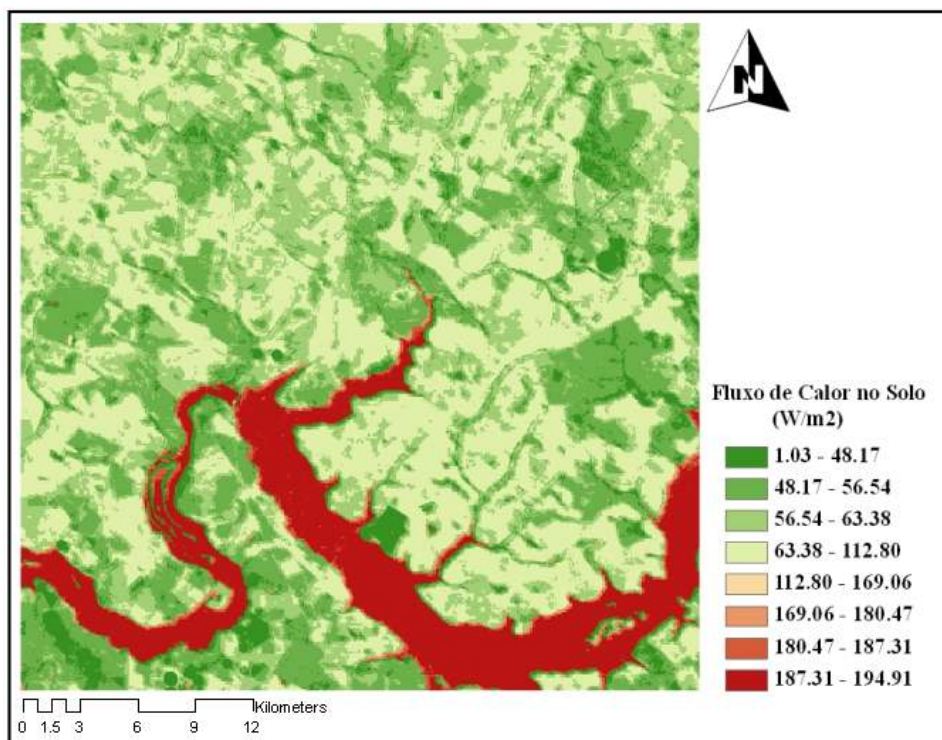


Figura 5 – Fluxo de calor no solo do dia 16/08/2008 para a região que abrange os municípios de Conceição das Alagoas e Água Comprida, no Triângulo Mineiro, Minas Gerais.

3.3. Fluxo de calor sensível

A determinação do fluxo de calor sensível é a parte central do SEBAL. Este fluxo é obtido por meio de um processo iterativo, no qual se considera inicialmente a atmosfera em condição neutra, sendo que, nas próximas iterações são feitas as correções de estabilidade atmosférica.

Na Figura 6 tem-se o fluxo instantâneo de calor sensível, ou seja, o H estimado para a área de estudo no momento da passagem do satélite (10:01 hs). Observa-se que, os menores fluxos ocorreram sobre o Rio Grande e os maiores sobre áreas com ausência de umidade na superfície (tonalidade vermelha). O fluxo de calor sensível variou no dia 16 de agosto de $-133,61 \text{ W/m}^2$ a $1123,98 \text{ W/m}^2$, com média de $254,50 \text{ W/m}^2$ (correspondente a terceira classe de verde). O H é elevado sobre uma superfície com ausência de umidade porque a maior parte da energia disponível (R_n) é utilizada no processo de aquecimento do ar. Silva e Bezerra (2006) comentam que valores negativos de H correspondem aos *pixels* cuja temperatura da superfície é inferior a temperatura do *pixel* frio, e correspondem, em geral, a corpos de água.

Silva e Bezerra (2006) obtiveram valores médios do fluxo de calor sensível da ordem de $130,20 \text{ W/m}^2$ e $158,30 \text{ W/m}^2$ para imagens dos dias 04/12/2000 e 04/10/2001, respectivamente. Estes autores mostraram que os menores valores do H foram encontrados em superfícies líquidas,

concordando com a tendência observada no Triângulo Mineiro.

Andrade (2008) também obteve valores negativos de H em áreas de superfícies de corpos d'água e em algumas áreas vegetadas pela cultura da cana-de-açúcar.

Em áreas de plantios de eucaliptos pertencentes à Celulose Nipo-Brasileira S/A (CENIBRA), no entorno do município de Santa Bárbara-MG, Menezes (2006) obteve H de 76,67 W/m² a 223,18 W/m², 180,72 W/m² a 216,86 W/m², -32,62 W/m² a 188,41 W/m² para imagens dos dias 20/06/2003, 24/09/2003 e 22/06/2004, respectivamente.

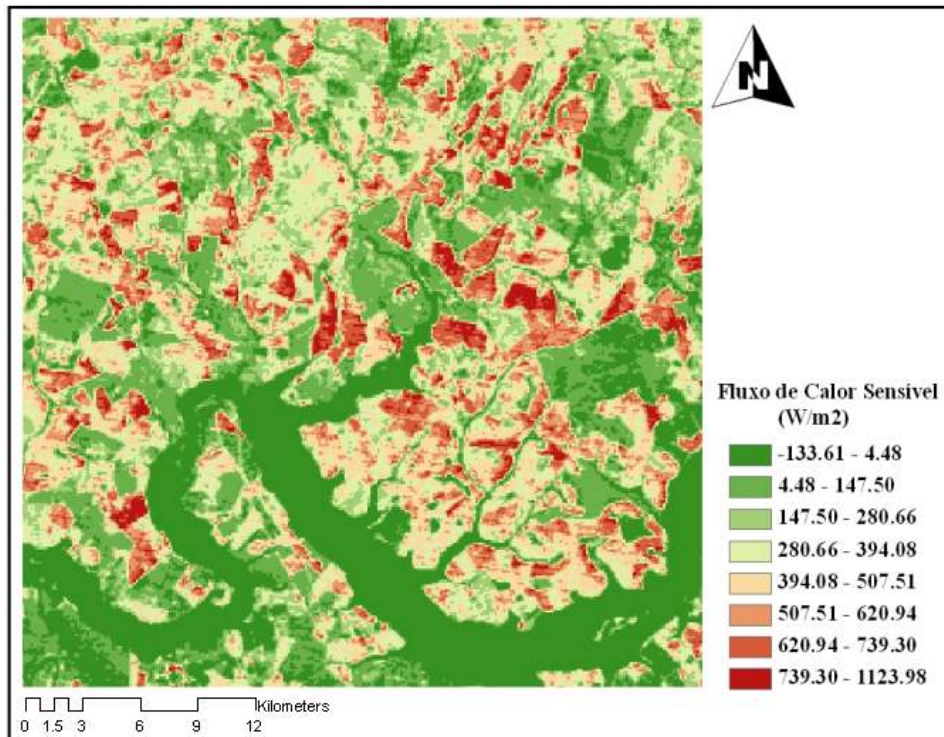


Figura 6 – Fluxo de calor sensível do dia 16/08/2008 para a região que abrange os municípios de Conceição das Alagoas e Água Comprida, no Triângulo Mineiro, Minas Gerais.

3.4. Fluxo de calor latente

O fluxo de calor latente é um dos componentes do balanço de energia e este termo é utilizado na estimativa da evaporação e/ou evapotranspiração. A Figura 7 apresenta os valores do λET para parte dos municípios de Conceição das Alagoas e Água Comprida (região do Triângulo Mineiro) no dia 16 de agosto de 2008. O fluxo de calor latente variou de 0,00 W/m² a 709,03 W/m², com um valor médio de 236,17 W/m² (terceira tonalidade de verde). A tonalidade de verde escuro corresponde ao intervalo de menores valores, 0,00 W/m² a 47,27 W/m², e a tonalidade de vermelho corresponde ao intervalo de maiores valores (578,34 a 709,03 W/m²).

Andrade (2008) ao analisar uma série de 22 imagens Landsat 5 – TM no período de 2004 a 2007, nos limites territoriais da Fazenda Boa Fé, município de Conquista, na região do Triângulo mineiro, Minas Gerais, obteve fluxo de calor latente (λET) oscilando de 0,00 W/m² a 1000,00 W/m², com valor médio das 22 imagens analisadas da ordem de 418,62 W/m². No entanto, foram encontrados valores médios de λET variando de 260,00 W/m² no dia 14/06/2008 a 800,00 W/m² no dia 24/01/2006.

Silva e Bezerra (2006) utilizando duas imagens do satélite Landsat 5 - TM obtidas em 04/12/2000 e 04/10/2001, que envolviam áreas irrigadas do Projeto Senador Nilo Coelho, parte do Lago de Sobradinho, áreas de vegetação nativa e parte da área urbana dos municípios de Petrolina-PE e Juazeiro-BA, encontraram valores de λET variando entre 0,00 W/m² e 628,40 W/m², e entre 0,00 W/m² e 612,30 W/m², respectivamente. Silva e Bezerra (2006) ainda citam que os valores médios do fluxo de calor latente foram 346,10 W/m² e 279,40 W/m² para as datas de 04/12/2000 e 04/10/2001, respectivamente.

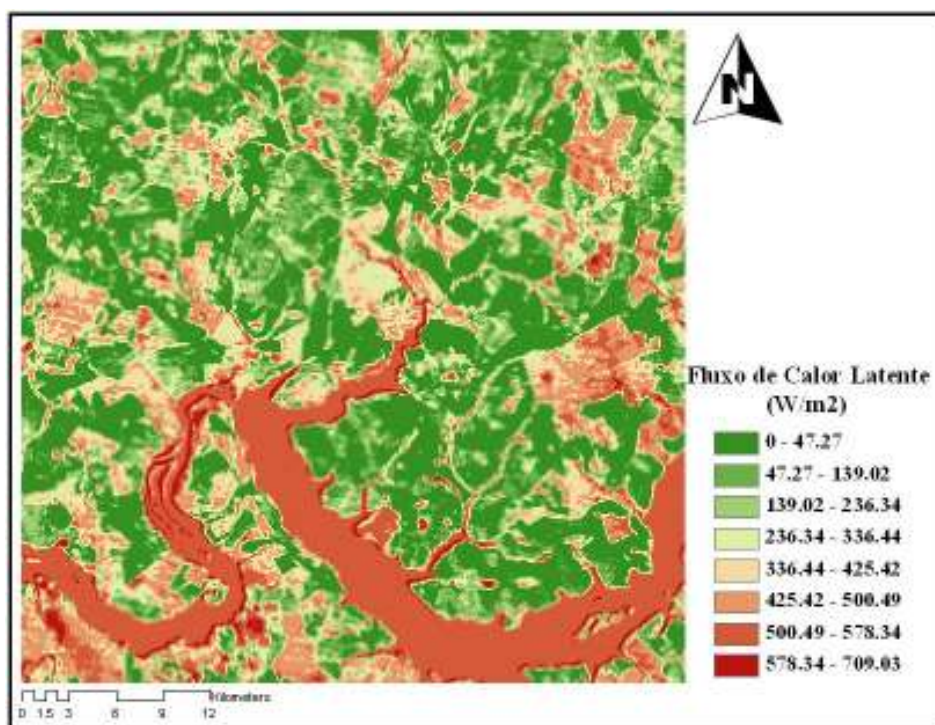


Figura 7 – Fluxo de calor latente do dia 16/08/2008 para a região que abrange os municípios de Conceição das Alagoas e Água Comprida, no Triângulo Mineiro, Minas Gerais.

3.5. Evapotranspiração

O SEBAL estima o fluxo de calor latente instantâneo como um “resíduo” da equação clássica do balanço de energia. Porém, para o dimensionamento de projetos e no manejo de sistemas de

irrigação valores horários e diários são mais necessários do que valores instantâneos. Neste contexto, será apresentada a evapotranspiração diária ($ET_{diária}$) para a região que abrange os municípios de Conceição das Alagoas e Água Comprida no dia 16 de agosto de 2008 (Figura 8). Vale destacar que a evapotranspiração estimada é a real e Bezerra (2006) cita que esta é inerente aos efeitos de salinidade, irrigação deficitária, doenças e pragas da cultura. A tonalidade vermelha corresponde ao intervalo de menores valores da $ET_{diária}$, 0,00 mm/dia a 0,63 mm/dia, e se localizou sobre áreas com ausência ou baixa umidade na superfície. O maior intervalo de valores da $ET_{diária}$, 7,75 mm/dia a 8,98 mm/dia, correspondem à tonalidade azul escura e se localizou principalmente sobre o Rio Grande, que fica na divisa entre Minas Gerais e São Paulo. As demais tonalidades representam os valores intermediários da evapotranspiração diária, sendo que o valor médio foi de 3,25 mm/dia (tonalidade verde clara).

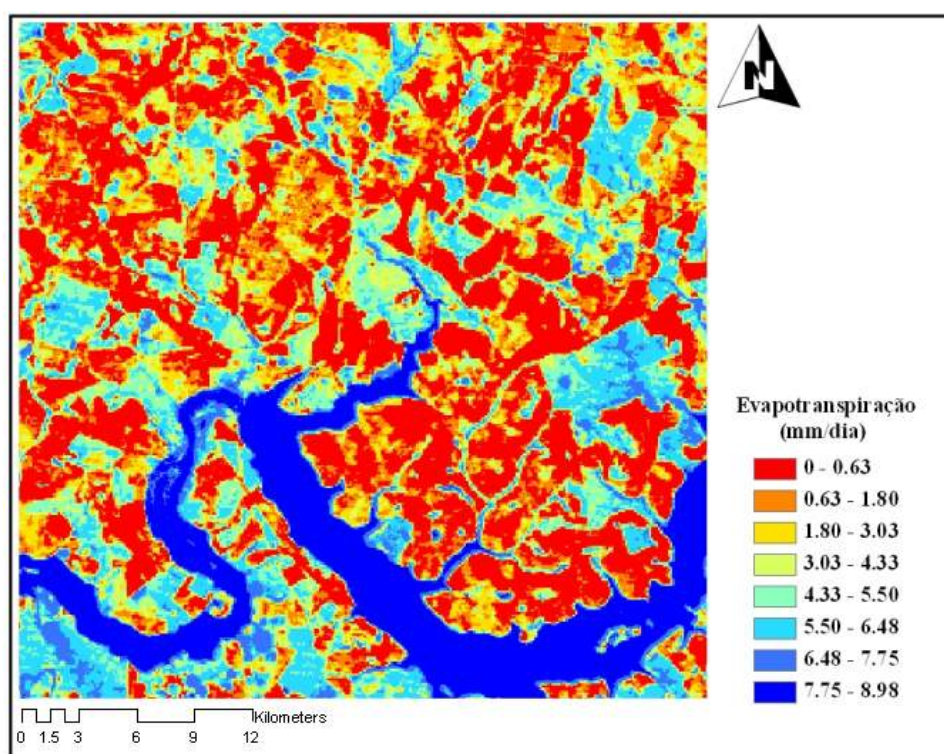


Figura 8 – Evapotranspiração diária do dia 16/08/2008 para a região que abrange os municípios de Conceição das Alagoas e Água Comprida, no Triângulo Mineiro, Minas Gerais.

A evapotranspiração diária, ou melhor dizendo evaporação, foi elevada sobre o Rio Grande devido a maior disponibilidade de energia (R_n), conforme observado na Figura 4. Isso concorda com o que Lima (2005) relatou, ou seja, que o processo de evapotranspiração (evaporação no caso do Rio Grande) é determinado pela quantidade de energia disponível para vaporizar a água.

Aynew (2003) aplicou o SEBAL na estimativa da evaporação de lagos e da evapotranspiração diária de superfícies vegetadas, utilizando dados do sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), na Etiópia. O autor cita que a evaporação diária dos lagos é altamente variável, variando de 4,9 mm/dia a 5,9 mm/dia. Na superfície vegetada, a evapotranspiração aumentou com a altitude seguindo a tendência de disponibilidade de umidade no solo ao invés do gradiente de temperatura. Na média a $ET_{diária}$ variou de 0,2 mm/dia, em solos lacustres e onde se tinha lago com água salgada por perto, a 4,5 mm/dia nos picos de montanhas cobertas com vegetação *afro-alpine*, sendo esta vegetação caracterizada por árvores acácia e decíduas, árvores de folhas verdes o ano inteiro e arbusto semi-perene. Este autor ainda cita que as diferenças espaciais dos resultados do SEBAL na superfície ficaram de acordo com as estimativas de métodos de evapotranspiração convencional (Penman 1948 e radiação).

Andrade (2008) obteve para os limites territoriais da Fazenda Boa Fé, município de Conquista, Triângulo Mineiro, Minas Gerais, valores de $ET_{diária}$ variando de 0,00 mm/dia a 10,00 mm/dia. A $ET_{diária}$ foi mínima em áreas de solo exposto e palhadas da cana-de-açúcar e máxima em áreas de duas pequenas represas (8,01 mm/dia a 10,00 mm/dia). Em áreas de mata nativa a $ET_{diária}$ variou de 1,51 mm/dia a 8,00 mm/dia, de acordo com o mês, ano e o estado da floresta (índice de área foliar, condição hídrica, porte, etc). Em áreas de cobertura da terra pela cultura da cana-de-açúcar a $ET_{diária}$ variou entre 0,30 mm/dia (com grande exposição do solo) e 6,10 mm/dia de acordo com o mês, ano e estágio de desenvolvimento da cultura.

Trezza (2006) obteve valores de $ET_{diária}$ na Venezuela, com uma imagem Landsat 7 - ETM+ do dia 14 de março de 2001, que oscilaram entre 0,01 mm/dia e 8,20 mm/dia em áreas agrícolas que abrangem o reservatório do Rio Guárico, localizado no estado de Guarico, sendo que, em áreas irrigadas, onde o arroz é o principal cultivo, a $ET_{diária}$ média foi de 4,43 mm/dia. Andrade (2008) obteve os menores valores de ET em áreas com solo exposto e palhada e os maiores valores sobre superfícies de corpos d'água. Já em áreas de cobertura da terra pela cultura da cana-de-açúcar, a ET variou de acordo com o estágio de desenvolvimento.

Comparou-se o resultado da ET_o , estimada pelo método de Penman-Monteith FAO (PM-FAO), com a evapotranspiração obtida por meio do SEBAL, no *pixel* em que se encontra a estação meteorológica. O resultado encontrado pelo método de PM-FAO foi de 5,49 mm/dia, enquanto que o estimado por meio do SEBAL foi de 4,34 mm/dia. A diferença foi de 1,15 mm/dia (20,95%). Um dos fatores que pode ter influenciado nessa diferença é a resolução espacial do Landsat 5 - TM, visto que a área de abrangência de cada *pixel* deste satélite é bem maior que a área gramada da estação, fazendo assim, que a $ET_{diária}$ estimada pelo SEBAL, para o *pixel* da estação, sofresse influência de áreas adjacentes.

4. CONCLUSÕES

Utilizou-se o recorte de uma imagem do satélite Landsat 5 - TM e o algoritmo SEBAL na estimativa geoespacial dos fluxos de energia e evapotranspiração, no dia 16 de agosto de 2008, nos municípios de Conceição das Alagoas e Água Comprida (região do Triângulo Mineiro). Diante dos resultados, conclui-se que:

O balanço de radiação variou de 307,46 a 649,72 W/m², sendo que o valor médio foi de 529,64 W/m². A tendência de maiores valores do Rn sobre superfícies líquidas e menores sobre os demais tipos de superfícies é explicada pelo efeito combinado do albedo e da temperatura da superfície, pois o primeiro termo influencia o balanço de ondas curtas e o segundo o balanço de ondas longas;

As médias do fluxo de calor no solo, sensível e latente foram de 75,88 W/m², 254,50 W/m² e 236,17 W/m², respectivamente;

A evapotranspiração estimada pelo SEBAL variou de 0,00 a 8,98 mm/dia, com média de 3,25 mm/dia. A diferença entre o resultado encontrado pelo método de PM-FAO e o obtido pelo SEBAL, no *pixel* em que se encontra a estação meteorológica, foi de 1,15 mm/dia (20,95%). Essa diferença pode ter sido influenciada pela resolução espacial do Landsat 5 - TM.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo financiamento parcial desta pesquisa.

BIBLIOGRAFIA

ÁGUA COMPRIDA/MG. Disponível em:
<http://www.aguacomprida.mg.gov.br/info_municipio.html>. Acesso em: 22.out.2008.

ALLEN, R. G. (2000). *REF-ET: Reference evapotranspiration calculation software*. University of Idaho Research and Extension Center Kimberly-USA, 76 p.

ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; WATERS, R.; BASTIAANSEN, W. (2002). *Surface energy balance algorithms for land*. Idaho Department of Water Resources, 97 p.

ANDRADE, R. G. *Aplicação do algoritmo Sebal na estimativa da evapotranspiração e da biomassa acumulada da cana-de-açúcar*. 2008. 135p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

- AYENEW, T. (2003). "Evapotranspiration estimation using thematic mapper spectral satellite data in the Ethiopian rift and adjacent highlands". *Journal of Hydrology* 279, pp. 83-93.
- BASTIAANSSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. (1998). "A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation". *Journal of Hydrology* 212-213, pp. 198-212.
- BEZERRA, B. G. (2006). *Balanço de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no cariri cearense através do algoritmo SEBAL*. 2006. 127 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- CHEMIN, Y.; PLATONOV, A.; UL-HASSAN, M.; ABDULLAEV, I. (2004). "Using remote sensing data for water depletion assessment at administrative and irrigation-system levels: case study of the Ferghana Province of Uzbekistan". *Agricultural Water Management* 64, pp. 183-196.
- CRAGO, R. D. (1996). "Conservation and variability of the evaporative fraction during the daytime". *Journal of Hydrology* 180, pp. 173-194.
- CUNHA, A. R.; ESCOBEDO, J. F.; KLOSOWSKI, E. S.; GALVANI, E. (2000). "Balanço de energia em cultivo protegido de pimentão" in *Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Rio de Janeiro, Out. 2008, pp. 11-20.
- FOLHES, M. T. (2007). *Modelagem da evapotranspiração para a gestão hídrica de perímetros irrigados com base em sensores remotos*. 2007. 186 p. (INPE-14804-TDI/1256). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- FOLHES, M. T.; SOARES, J. V.; RENNÓ, C. D.; CORREIA, A. H. (2007). "Estimativa de fluxos de energia por meio do modelo METRIC em região semi-árida" in *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Abr. 2007, pp. 3349-3356.
- FRENCH, A. N.; JACOB, F.; ANDERSON, M. C.; KUSTAS, W. P.; TIMMERMANS, W.; GIESKE, A.; SU, Z.; SU, H.; MCCABE, M. F.; PRUEGER, J.; BRUNSELL, N. (2005). "Surface energy fluxes with the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) at the Iowa 2002 SMACEX site (USA)". *Remote Sensing of Environment* 99, pp. 55-65.
- LIMA, E. P. (2005). *Evapotranspiração de referência de Penman-Monteith, padrão FAO (1998), a partir de dados de temperaturas máxima e mínima de Minas Gerais*. 2005. 67 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- MENEZES, S. J. M. C. (2006). *Evapotranspiração regional utilizando o SEBAL em condições de relevo montanhoso*. 2006. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. (1997). *Evapo(transpi)ração*. FEALQ Piracicaba-SP, 449 p.

RUHOFF, A. L.; COLLISCHONN, W.; FREITAS, R. M.; JUÁREZ, R. I. N.; ROCHA, H. R. (2008). “*Estimativa da sazonalidade da evapotranspiração em plantação de cana-de-açúcar (saccharum sp.) a partir de dados do sensor TERRA/MODIS*” in Anais do II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste, Rio de Janeiro, Out. 2008, pp. 1-20.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. (2005). “*Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 - TM*”. Revista Brasileira de Meteorologia 20 (2), pp. 243-252.

SILVA, B. B.; BEZERRA, M. V. C. (2006). “*Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - Landsat 5*”. Revista Brasileira de Agrometeorologia 14 (2), pp. 174-186.

TREZZA, R. (2006). “*Evapotranspiration from a remote sensing model for water management in an irrigation system in Venezuela*”. Interciencia 31 (6), pp. 417-423.