

Espacialização dos componentes do balanço de energia e de evapotranspiração na região Norte de Minas Gerais, utilizando o modelo SEBAL e imagens orbitais Landsat 5 TM

Isa Maria de Paula Boratto¹
Reinaldo Lúcio Gomide²

¹ Mestranda da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação em Geografia - Bolsista do Convênio Embrapa/Monsanto/Funarbe, Av. Itaú, 505 - Prédio Emaús - Bairro Dom Cabral – CEP 30535-012 - Belo Horizonte - MG – Brasil
isaboratto@yahoo.com.br

² Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Milho e Sorgo
Rodovia MG 424 – Km 45 – Caixa Postal 151 – CEP 35702-098 – Sete Lagoas – MG – Brasil
gomide@cnpms.embrapa.br

Abstract. The combination of the two processes by which the water vapor is transferred into the atmosphere due to evaporation from the soil and transpiration from vegetation is called evapotranspiration (ET). The determination of ET values is very useful information for planning irrigation, water supply estimation, regulation of water rights and river basins hydrologic studies. Values of ET in the North region of Minas Gerais state were estimated in this research from the multispectral images data of the Landsat 5 TM satellite by means of the model Surface Energy Balance Algorithm for Land- SEBAL, based on the simplified energy balance equation of a surface covered by vegetation, using a few daily surface climatological parameters (wind speed, rainfall, air temperature and relative humidity, solar radiation). The aim of this study was to estimate the regional spatial distribution of the energy balance components and evapotranspiration in the study area, covering the irrigated perimeter of Gortuba, involving the cities of Nova Porteirinha, Janaúba, Porteirinha, Verdelândia and Pai Pedro. Thematic maps of regional energy balance components, evapotranspiration, and soil cover vegetation conditions were generated from spectral analyzes of the images obtained, associated with the used weather data. The ability of SEBAL to provide the spatial variability of energy balance components, including evapotranspiration, demonstrated its sensitivity to different occupation of the soil surface vegetation, and to high data temporal and spatial resolutions data, indicating that the SEBAL model can be used in scales and operational routine.

Palavras-chave: remote sensing, geographic information systems, modeling, water resources, irrigated district, sensoriamento remoto, geoprocessamento, modelagem, recursos hídricos, perímetro irrigado.

1. Introdução

A estimativa da evapotranspiração (ET) em escalas global, regional e local é uma das mais importantes informações dos componentes do balanço hídrico, sendo essencial em estudos que envolvam a programação de irrigação, o planejamento e o manejo dos recursos hídricos para o uso agrícola, bem como em vários trabalhos meteorológicos e climatológicos, consistindo em um parâmetro de ligação entre energia, clima e hidrologia (BRAUN, et al., 2001). No final o conhecimento dos valores de ET contribui também para os estudos de demanda por água em outros setores, tais como o urbano e o industrial.

É indispensável em planos de gerenciamento dos recursos hídricos, o conhecimento em escala regional de valores da ET, uma vez que, juntamente com outros fatores ambientais, condicionam temporal e espacialmente as disponibilidades e os déficits hídricos (SANTIAGO, 2001; ALKAEED et al., 2006). Há necessidade de instalação e operação de redes de estações meteorológicas, padrões ou automáticas, que geram os dados necessários nas diferentes equações de determinação da ET, demandando para isso recursos econômicos e humanos, com capacitação,

nem sempre disponíveis. Conseqüentemente, a rede de postos ou estações meteorológicas, para monitorar e registrar esses dados necessários ao estudo e conhecimento desse parâmetro ambiental é esparsa e não muito bem distribuída, principalmente nas regiões Norte e Nordeste do estado de Minas, limitando que a distribuição espacial e temporal da evapotranspiração seja adequadamente conhecida.

Nesse sentido, o sensoriamento remoto é de grande utilidade, tanto na estimação de parâmetros relacionados à temperatura e radiação na superfície coberta pela vegetação, como no desenvolvimento de modelos biofísicos ou empíricos, em que os fatores relacionados à evapotranspiração sejam passíveis de mapeamento remoto, como é o caso do uso do método do balanço de energia, junto com o estudo de dissipação de seus componentes a partir do saldo radiação: o fluxo de calor sensível, o fluxo de calor no solo e fluxo de calor latente (ENGMAN, 1993).

O Modelo *Surface Energy Balance Algorithm for Land*- SEBAL, estima a evapotranspiração a partir do balanço de energia da superfície coberta pela vegetação, calculando o fluxo de calor latente, que é a fração de energia dissipada na ET, para cada pixel da imagem de um satélite, como um resíduo da equação clássica do balanço de energia (BASTIAANSEN et al., 1998). O objetivo geral deste trabalho foi estimar e espacializar os componentes do balanço de energia e a evapotranspiração na região que abrange o perímetro irrigado de Gortuba, envolvendo o município de Nova Porteirinha e parte dos municípios de Janaúba, Porteirinha, Verdelandia e Pai Pedro, no Norte de Minas Gerais, utilizando o modelo/ algoritmo do balanço de energia de uma superfície para terra - SEBAL e duas imagens do satélite Landsat 5 TM, associado às técnicas de geoprocessamento (SIG), para geração de mapas temáticos dos componentes do balanço de energia, da evapotranspiração e das condições de cobertura dos solos para a referida região, a partir de análises espectrais das imagens obtidas.

2. Metodologia de Trabalho

A área da pesquisa é o Perímetro Irrigado de Gortuba, que está inserida entre os municípios de Nova Porteirinha, Janaúba e Porteirinha e parte dos municípios de Verdelandia e Pai Pedro, na região norte do Estado de Minas Gerais, coordenadas geográficas de 15°47' de latitude sul e 43°18' de longitude oeste e a altitude média de 516 metros. A região tem como característica um clima semiárido, de inverno seco e quase sem chuva, com duração de cinco a oito meses. Já o clima do verão é de temperaturas do ar mais elevadas e chuvoso, com duração de quatro a sete meses, período em que as precipitações pluviais são de distribuição irregular no tempo e no espaço, a diversidade biológica mostra-se extremamente rica. Fisicamente, a região está incluída na transição dos domínios do Cerrado e da Caatinga, apresentando como principais fisionomias o Cerrado Sentido Restrito e a Floresta Estacional Decidual, chamadas generalizadamente de Matas Secas (RIZZINI, 1997). A Vegetação quase totalmente caducifolia, cinza-calcinada nos meses secos, exuberantemente verdes nos meses chuvosos.

Utilizou-se duas imagens de satélite do Mapeador Temático Landsat-5 (Landsat 5 TM), que caracterizaram dois períodos distintos, um úmido (24/01/2011) e outro seco (17/08/2010), da região do perímetro irrigado de Gortuba no norte de MG, obtidas junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A identificação das imagens é órbita 218 ponto 71, a projeção adotada foi a *Universal Transverso de Mercator* e DATUM “*South American Datum*” (SAD 69), zona 23 sul. Os dados meteorológicos usados na pesquisa foram obtidos de uma Estação Climatológica Padrão do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), vinculado ao MAPA, na área de pesquisa e experimentação da EPAMIG, localizada no município de Nova Porteirinha. Os

dados climáticos utilizadas dessa estação foram as médias diárias de precipitação, temperatura do ar (máxima e mínima), umidade relativa do ar (máxima e mínima), velocidade do vento (a 2 metros de altura), pressão atmosférica, radiação solar e número de horas de insolação.

A evapotranspiração e os componentes do balanço de energia da área pesquisada foram estimados a partir do uso de imagens do satélite Landsat 5 TM, por meio do modelo/algoritmo SEBAL (BASTIAANSEN et al., 1998), versão descrita por Allen et al. (2002). Este modelo é baseado na equação simplificada do balanço de energia de uma superfície coberta por vegetação, que utiliza um reduzido número de dados climatológicos de superfície, necessários ao equacionamento do balanço de energia e à caracterização da espacialização dos parâmetros estudados pelo referido modelo, ou seja, os resultados obtidos não são referentes somente a um ponto, mais sim a uma região.

O modelo/algoritmo SEBAL é composto por 25 passos computacionais e divididos em duas etapas, que foram inseridos e testados no módulo *Model Maker* do software Erdas 2011 e os mapas temáticos foram processados no software ArcGis 9.3. Foram realizadas as estimativas do balanço de radiação e energia da superfície estudada juntamente com as respectivas resistências para o transporte de *momentum*, para calor e vapor d'água relacionados ao saldo de radiação (Rn) e à dissipação desse Rn nos fluxos de calor do solo, de calor sensível e de calor latente, sendo esse último a fração de energia usada na evapotranspiração. Os fluxogramas da 1ª. etapa do processamento do balanço de radiação da superfície e o fluxo de calor no solo e da 2ª. etapa do processamento do fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente, com o modelo SEBAL são apresentados na Figura 1 (BAASTIAANSEN, 1995; BASTIAANSEN et al., 1998). Todos os elementos apresentados nos fluxogramas da Figura 1 foram calculados para todos os pixels das imagens, individualmente.

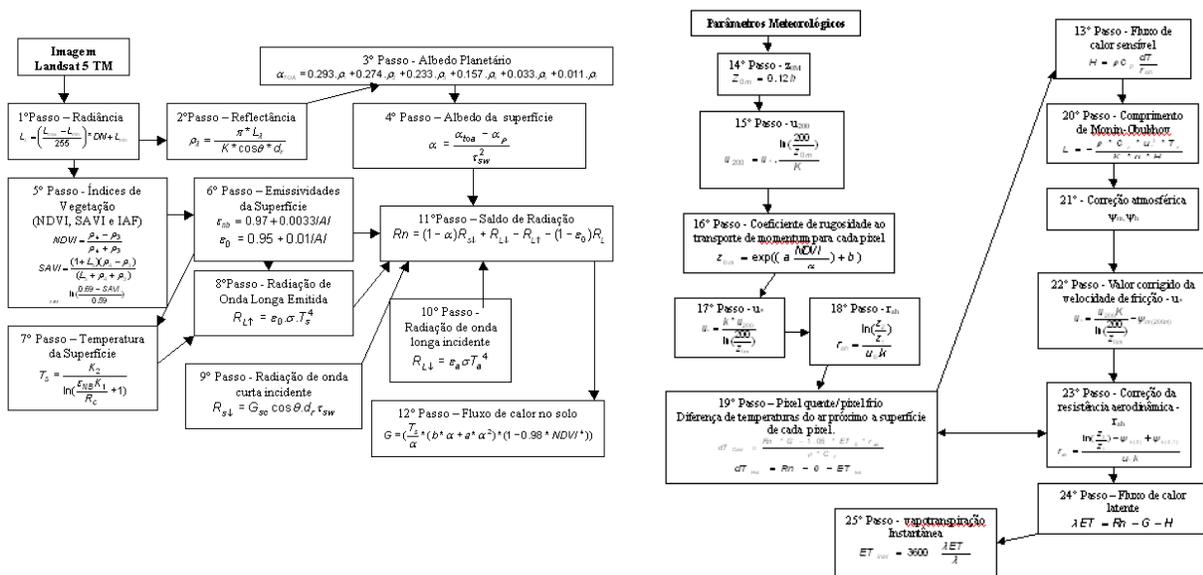


Figura 1. Fluxograma da 1ª. etapa do processamento do balanço de radiação à superfície e fluxo de calor no solo – Modelo SEBAL; Fluxograma da 2ª. etapa do processamento do fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente – Modelo SEBAL.

3. Resultados e Discussão

O saldo de radiação (Rn) na superfície terrestre, coberta com a vegetação, representa a energia disponível aos processos físicos e biológicos, que é a energia resultante do balanço entre todos os fluxos de radiação de ondas curtas e ondas longas, tanto as incidentes (que chegam) como as emitidas (que saem) da superfície. O Rn é um componente fundamental para a estimativa do balanço de energia.

A Figura 3 mostra os mapas das imagens processadas da distribuição espacial do cálculo dos valores instantâneos do saldo de radiação (Rn) à superfície, para dois períodos, um seco (17/08/2010) e outro úmido (24/01/2011), com o modelo/ algoritmo SEBAL, para a região Norte de Minas Gerais. As áreas com tonalidade vermelha em ambas as imagens (períodos seco e úmido) representam os maiores valores de Rn, que respectivamente representam a barragem Bico da Pedra, algumas áreas do Perímetro Irrigado de Gorutuba e na imagem do período seco a sudeste, uma área de mata nativa que apresenta também os maiores valores de Rn ($640-702 \text{ W m}^{-2}$), devido ao fato dessas sub-áreas apresentarem uma maior disponibilidade hídrica do solo, conseqüentemente uma maior vigor vegetativo.

Já as menores classes de valores de Rn na Figura 2 são representadas pelas cores amarela e laranja claro, cujos intervalos para o período seco é de $545- 570 \text{ W m}^{-2}$ e para o período úmido de $664,01-690,24 \text{ W m}^{-2}$, representando as sub-áreas sem vegetação. Na imagem do período úmido há uma pequena área (sudeste) representada pela classe na cor amarela, que possui valores baixos de Rn mas que são devido a ocorrência de nuvens. E os valores intermediários de Rn são representados pelas tonalidades de classes na cor laranja, que estão variando de $690,24 -712,29 \text{ W m}^{-2}$, para o período úmido e de $570- 640 \text{ W m}^{-2}$ para o período seco, representando áreas com baixa cobertura vegetativa.

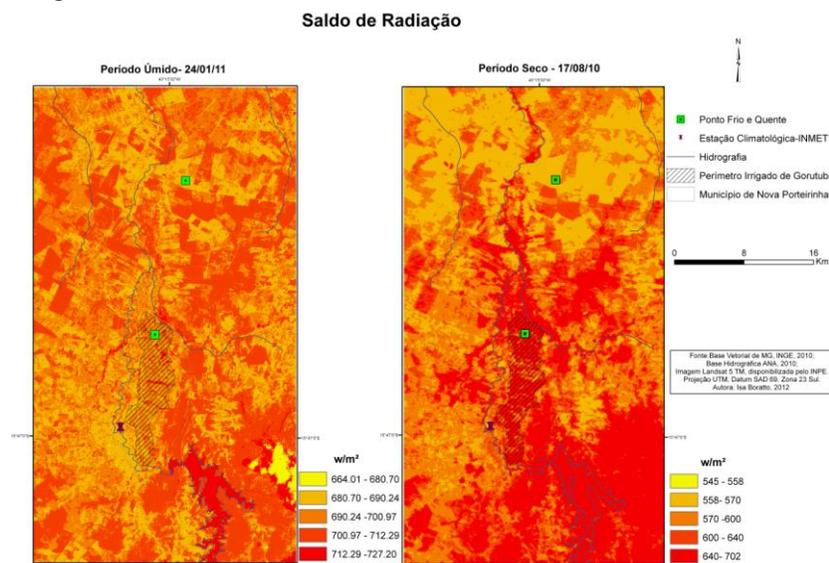


Figura 2. Mapas das imagens processadas da distribuição espacial do cálculo do saldo de radiação instantâneo, para dois períodos, um seco (17/08/2010) e outro úmido (24/01/2011) - Modelo SEBAL, para a região Norte de Minas Gerais.

O fluxo de calor no solo é o parâmetro mais difícil para se ter uma boa estimativa com técnicas de sensoriamento remoto. A equação usada nesta pesquisa para estimativa do G fundamenta-se em quatro variáveis: temperatura da superfície, albedo da superfície, NDVI e o

saldo de radiação. A dificuldade está relacionada à alguns parâmetros físicos, como: tipo de solo, textura, estrutura e cobertura vegetal, este último com grande variação temporal e espacial (COSTA FILHO, 2005).

Mapas das imagens processadas da distribuição espacial do cálculo de fluxo de calor no solo (G), para dois períodos, um seco (17/08/2010) e outro úmido (24/01/2011), com o modelo SEBAL, para a região Norte de Minas Gerais, são mostrados na Figura 3. Verifica-se que os valores de G são bem distintos em relação aos períodos seco e úmido estudados. No período úmido, os valores de G são bem baixos, pelo fato de ser um período chuvoso, onde a vegetação está mais exuberante, não possuindo grandes áreas do solo exposto, o que caracteriza ser um mapa mais homogêneo, onde a variação das classes situou-se na faixa de 0 –305 W m⁻².

Já no período seco, os valores de G aumentam consideravelmente e o mapa apresentado é mais heterogêneo. Os menores valores de G estão representados pelas classes nas tonalidades amarela e laranja claro, indicando feições com uma vegetação mais densa ou água (Figura 4). Observa-se que na imagem estas feições são claramente representadas pela barragem Bico da Pedra, áreas com vegetação nativa (sudeste) e áreas no Perímetro Irrigado de Gorutuba. As tonalidades de classes nas cores laranja representam áreas com uma vegetação intermediária, por exemplo, áreas de pastagem. As áreas de maiores valores de G (59,36 – 68,20 W m⁻², cor vermelha) predominam na imagem do período seco, correspondem áreas com solo exposto ou com uma vegetação muito rala.

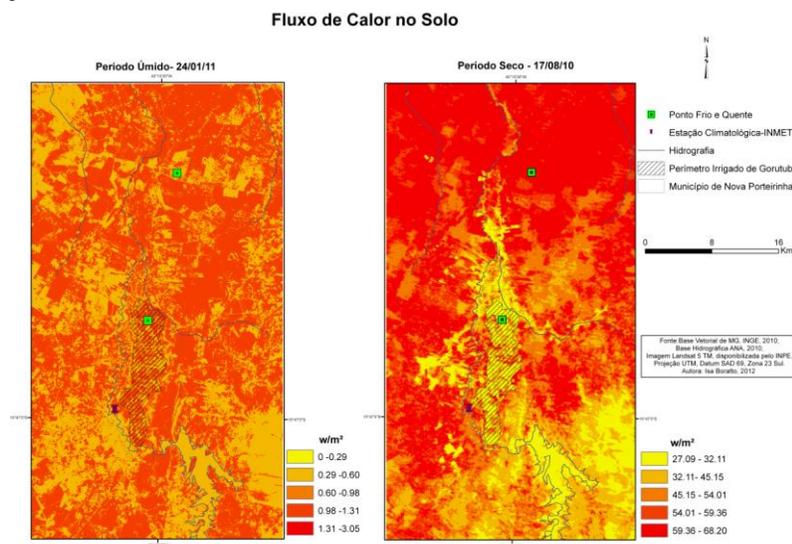


Figura 3. Mapas das imagens processadas da distribuição espacial do cálculo de fluxo de calor no solo (G), para dois períodos, um seco (17/08/2010) e outro úmido (24/01/2011) - Modelo SEBAL, para a região Norte de Minas Gerais.

O passo para o cálculo do fluxo de calor sensível (H) é o mais complexo. Baastiaanssen (1995) fundamentou sua teoria na necessidade da escolha de dois pixels, um quente e outro frio, denominados de pixels âncoras. Allen et al. (2002) recomendam selecionar o pixel frio em uma área bem irrigada, admitindo que a mesma represente uma área onde ocorra evapotranspiração de referência (ET_o), que representem valores de ET potencial ou máximo. Esses dois pixels foram utilizados para se obter os coeficientes da função linear apresentada na Figura 2, que caracteriza a diferença da temperatura.

A Figura 5 mostra os mapas das imagens processadas com o modelo SEBAL da distribuição espacial do cálculo do fluxo de calor sensível (H), para dois períodos, um seco (17/08/2010) e outro úmido (24/01/2011), para a região Norte de Minas Gerais. Observa-se que os valores mais

elevados de H encontram-se nas regiões dotadas de menores coberturas vegetativas. Na imagem do período úmido, nota-se uma variação mais nítida de H, sendo que na área do perímetro irrigado de Gorutuba, onde se tem uma maior disponibilidade hídrica no solo, com a vegetação não sofrendo estresse hídrico, foram verificadas classes com valores mais baixos de H (340,26 – 364,31, cor laranja claro). A média estimada dos valores de H para o período úmido foi de 358,91 $W m^{-2}$, sendo que a amplitude de variação de H ficou entre 277 e 402,06 $W m^{-2}$.

Observa-se que o fluxo de calor sensível no mapa do período seco não é apenas controlado pelo saldo de radiação, mas também pela cobertura do dossel (Figura 4). A senescência das folhas da vegetação/culturas, causada principalmente pela baixa disponibilidade de umidade no solo na estação seca, reduz a atividade fotossintética das plantas, diminuindo-se o índice de vegetação e a área foliar da vegetação, conseqüentemente uma maior fração de energia do saldo radiação é dissipada na forma de fluxo de calor sensível. Os resultados indicam que os valores máximos de H ocorreram em agosto (período seco), quando comparado com o período úmido. A média estimada de H para o período seco foi 371,44 $W m^{-2}$, sendo que a amplitude de variação dos valores de H situou-se entre 310,52 – 371,44 $W m^{-2}$.

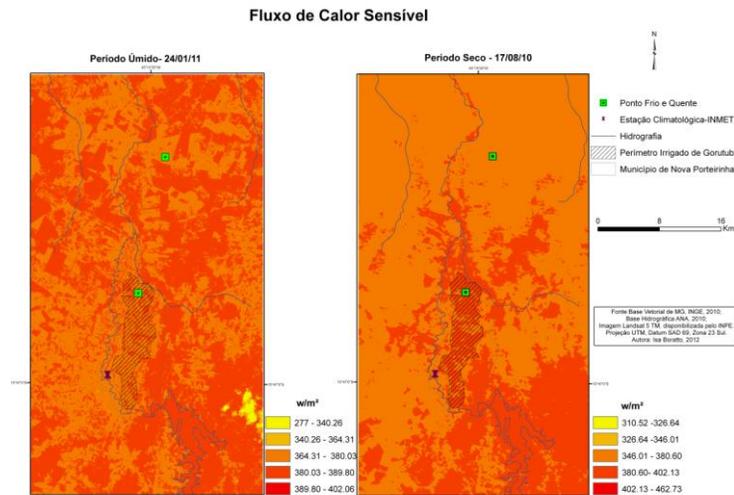


Figura 4. Mapas das imagens processadas da distribuição espacial do cálculo do fluxo de calor sensível (H), para dois períodos, um seco (17/08/2010) e outro úmido (24/01/2011) - Modelo SEBAL, para a região Norte de Minas Gerais.

O fluxo de calor latente λET ($W m^{-2}$) foi obtido pela diferença entre o saldo de radiação e os fluxos de calor no solo e de calor sensível, conforme descrito na metodologia considerando a parte residual do balanço de energia à superfície (BAASTIAANSSEN, 1995). A precisão na determinação do λET é dependente da precisão dos cálculos dos termos da equação do balanço de energia R_n , G e H .

Os mapas das imagens processadas da distribuição espacial do cálculo do fluxo de calor latente (λET), com o modelo SEBAL, para dois períodos, um seco (17/08/2010) e outro úmido (24/01/2011) na região Norte de Minas Gerais são mostrados na Figura 6 e são os principais mapas gerados pelo modelo SEBAL. Os resultados obtidos indicam que o período úmido apresentou maiores valores de λET em relação ao período seco e também uma maior uniformidade das classes, devido ao fato de se tratar de período chuvoso na região. A classe que apresenta os intervalos de λET de 295,47 – 306,22 $W m^{-2}$ (cor laranja) é predominante na imagem do período úmido e a classe que apresenta os maiores valores de λET 316,26 - 320,47 $W m^{-2}$ (cor

vermelha), está representada pela barragem Bico da Pedra, leitos de rios e alguns canais dentro do perímetro irrigado de Gortutuba. Já os menores valores de λET situaram na faixa de 230,90 – 241,73 $W m^{-2}$ (cor amarela) e representam a vegetação com certo grau de estresse hídrico ou mesmo solos expostos.

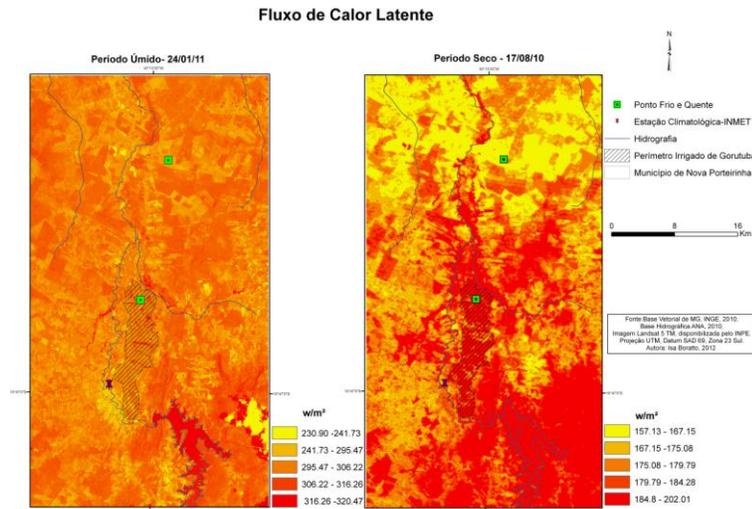


Figura 5. Mapas das imagens processadas da distribuição espacial do cálculo do fluxo de calor latente (λET), com o modelo SEBAL, para dois períodos, um seco (17/08/2010) e outro úmido (24/01/2011) na região Norte de Minas Gerais.

O comportamento da variação de λET no período seco é bem semelhante ao período úmido, sendo que foram obtidos valores um pouco mais baixos de λET e uma distribuição desses valores na imagem numa forma mais heterogênea (Figura 5). Os maiores valores de λET (184,8 – 202,01 $W m^{-2}$) no período seco estão representados pela cor vermelha, concentrada na parte sul e sudeste do mapa na imagem, onde estão localizadas a barragem Bico da Pedra, a mata nativa e o perímetro irrigado de Gortutuba. Por ser um período onde não ocorreu precipitação, pode-se concluir que nesses locais houve disponibilidade hídrica no solo e um adequado manejo da irrigação, o que provavelmente proporcionou uma melhor resposta da vegetação/ dos cultivos à prática agrícola da irrigação.

Por outro lado, as menores classes de variação de λET no período seco ficaram entre 157,13 – 175,08 $W m^{-2}$ (cores amarela e laranja claro), representando vegetações que sofreram estresse hídrico, consequentemente locais com vegetação muito pouco densa ou rala ou até mesmo solos expostos (norte da Imagem). As classes intermediárias de valores de λET situaram entre 175,08 – 184,28 $W m^{-2}$, representando áreas com uma vegetação menos exuberante (no caso da região áreas de pastagem), que provavelmente estão começando a sofrer com o estresse hídrico.

4. Conclusões

A partir de dados extraídos de pixels de imagens orbitais de satélite Landsat 5 TM e de estação climatológica de superfície foi possível obter os mapas das imagens processadas da variação espacial dos componentes do balanço de energia (R_n , G e H) e da evapotranspiração (λET), em dois períodos distintos (seco e úmido), para a região Norte de Minas Gerais, gerados com o modelo SEBAL, evidenciando a sensibilidade desse modelo à diferentes alvos e ocupações

da superfície do solo, coberta com vegetação, como importante ferramenta, operacional e de rotina, no monitoramento de necessidades hídrica de culturas e nos estudos ambientais de recursos hídricos em perímetros irrigados e bacias hidrográficas.

Há necessidade de verificação com dados de medidas diretas de campo de balanço de energia, saldo radiação e de dissipação dos fluxos de calor do solo, sensível e latente, para se ter a verdade terrestre e poder comparar com os resultados de outros locais e países.

Agradecimentos

Trabalho financiado pelos projetos de Pesquisa MP2 Seca Cereais Embrapa/Monsanto/Funarbe - Código 02.08.10.003.00.02 e Determinação da produtividade da água em diferentes ecossistemas da Bacia do Rio São Francisco no Norte de Minas Gerais, a partir de imagens de satélites e de dados de uma rede de estações agrometeorológica - Código 02.10.06.004.00.00. À Embrapa/Monsanto/Funarbe, pela concessão de bolsa a primeira autora.

Referências Bibliográficas

Allen, R.; Tasumi, M.; Trezza, R. **SEBAL Surface Energy Balance Algorithm for Land – Advanced Training and Users Manual** – Idaho Implementation, version 1.0, 2002a.

Alkaeed, O; Flores, C; Jinno, K; Tsutsumi, A. Comparison of several reference evapotranspiration methods for Itoshima Peninsula area, Fukuoka, Japan. **Memoirs of the Faculty of Engineering**, Kyushu University, v. 66. p 1 - 14. 2006.

Bastiaanssen, W. G. M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climate. Netherlands: CIP Data **Koninklijke Bibliotheek, Den Haag**, p. 272 1995.

Bastiaanssen, W. G. M Remote sensing in water resources management: the state of the art. **International Water Management Institute**, Sri Lanka. 1998.

Braun, P.; Maures, B.; Muller, 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.

COSTA, J.F.F. Avaliação dos componentes do Balanço de Energia e Evapotranspiração em região semi-árida usando imagens orbitais Landsat-5TM e Terra Modis. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Programa Institucional de Pós Graduação em Recursos Naturais-PIPRN, 2005. Disponível em: < http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=104910> Acesso 01 de março 2012.

Engman, E. T. Remote Sensing. In: **Handbook of Hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1993. p. 24.1 – 24. 23.

RIZZINI, C. T. **Tratado de Fitogeografia do Brasil: aspectos ecológicos, sociológicos e florísticos**. 2 ed., Rio de Janeiro: Âmbito Cultural, 1997, 64-65 p.

SANTIAGO, A. V. Evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO-56), nas escalas mensal e decenal. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo. Piracicaba. 2001. Disponível em:<www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11131/tde.../SantiagoMs.pdf>. Acesso 05 de fevereiro 2011.