

Determinação dos componentes do balanço de energia com imagens MODIS no município de Petrolina-PE, Brasil

Antônio Heriberto de Castro Teixeira¹

Morris Sherer-Warren²

Hélio Leandro Lopes³

Fernando Braz Tangerino Hernandez⁴

¹Embrapa Semiárido - CPATSA/Embrapa

Caixa Postal 23 - 56302-970 - Petrolina - PE, Brasil

heriberto.teixeira@embrapa.br

² Agência Nacional das Águas - ANA

Caixa Postal 9659 - 30160-030 - Brasília - DF, Brasil

morris@ana.gov.br

³Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF

Caixa Postal 252 - 56310-406 - Petrolina - PE, Brasil

heliovASF@hotmail.br

⁴Universidade de São Paulo - UNESP

Caixa Postal 34 - 13385-000- Ilha Solteira - SP, Brasil

fbthtang@agr.feis.unesp.br

Abstract. In the Petrolina Municipality, Brazil, the natural vegetation has been replaced by irrigated agriculture, bringing importance for the quantification of the effects on the energy exchanges between the mixed vegetated surfaces and the low atmosphere. MODIS satellite images and agro-meteorological data for the years of 2010 and 2011 were used together, for modelling these exchanges. Surface albedo (α_0), NDVI and surface temperature (T_0) were the basic remote sensing parameters necessary to calculate the latent heat flux (λE) and the surface resistance to evapotranspiration (r_s) on a large scale. The daily net radiation (R_n) was retrieved from α_0 , air temperature (T_a) and short-wave transmissivity (τ_s) throughout the slob equation, allowing the quantification of the daily sensible heat flux (H) by residual in the energy balance equation. With threshold values for r_s , it was possible to separate the energy fluxes from crops and natural vegetation. The averaged fractions of R_n partitioned as H and λE , were in average 71 and 22%, and 29 and 78% when considering irrigated crops and natural vegetation, respectively. The tools and models applied in the current research, can subsidize the monitoring of the coupled climate and land use changes effects on a municipality scale, being valuable when aiming the sustainability of the water resources in the future.

Palavras-chave: net radiation, latent heat flux, sensible heat flux, surface resistance, saldo de radiação, fluxo de calor latente, fluxo de calor sensível, resistência da superfície.

1. Introdução

O município de Petrolina, Estado de Pernambuco, Brasil, vem se tornando um importante centro agrícola, como resultado do avanço dos sistemas de irrigação utilizados nas vizinhanças do Rio São Francisco. Considerando-se os efeitos das mudanças de uso da terra e climáticos, o uso de ferramentas, como o sensoriamento remoto por imagens de satélites, para a quantificação das trocas de energia entre a vegetação e a baixa atmosfera em larga escala se torna muito importante (Tang et al. 2009; Teixeira, 2010, Miralles et al. 2011).

Quantificações dos componentes dos balanços de radiação e energia bem como de parâmetros da vegetação em culturas irrigadas e vegetação natural na região semiárida do Brasil foram realizadas através de medições em campo (Teixeira et al., 2008). Entretanto, métodos pontuais fornecem valores para locais específicos e falham na estimativa destas

variáveis em larga escala, devido à significante heterogeneidade espacial destes componentes em uma mistura de agros-ecossistemas.

Entretanto, uma das dificuldades do monitoramento dos fluxos de energia com imagens de satélites é o requerimento de algoritmos que sejam realísticos biofisicamente, mas simples o bastante para parametrização e implementação (Cleugh et al., 2007). Os modelos baseados no balanço de energia tem a vantagem de, enquanto consideram as condições das culturas, não requerem a classificação da vegetação, entretanto, para alguns destes há a necessidade da identificação de condições hidrológicas extremas, o que torna difícil a aplicação durante o período chuvoso na região semiárida do Brasil, devido à homogeneidade da umidade do solo em larga escala para os agros-sistemas mistos.

Considerando a simplicidade de aplicação e da não necessidade tanto da classificação de culturas nem de extremos hidrológicos, um algoritmo para a obtenção da ET baseado na equação de Penman-Monteith, denominado SAFER (*Simple Algorithm For Evapotranspiration Requirement*) foi desenvolvido e validado com dados de experimentos de campo envolvendo culturas irrigadas e vegetação natural nas condições semiáridas brasileiras (Teixeira 2012a). Um segundo modelo biofísico foi também elaborado para calcular a resistência da superfície aos fluxos hídricos (r_s) em larga escala, o qual quando estabelecidos valores limites para r_s , é bastante útil para a classificação da vegetação em culturas irrigadas e espécies naturais (Teixeira 2012b).

O objetivo da atual pesquisa foi testar a aplicação destes modelos simplificados baseados no uso conjunto de imagens MODIS e dados climáticos de estações agrometeorológicas para a obtenção e análises dos componentes do balanço energia no município de Petrolina-PE, Nordeste do Brasil, como subsídio ao manejo racional dos recursos hídricos em situações de rápida mudança de uso da terra e climáticas.

2. Metodologia de trabalho

A Figura 1 apresenta as localizações do município de Petrolina no Estado de Pernambuco (PE), Nordeste do Brasil, juntamente com a rede de estações agrometeorológicas utilizadas.

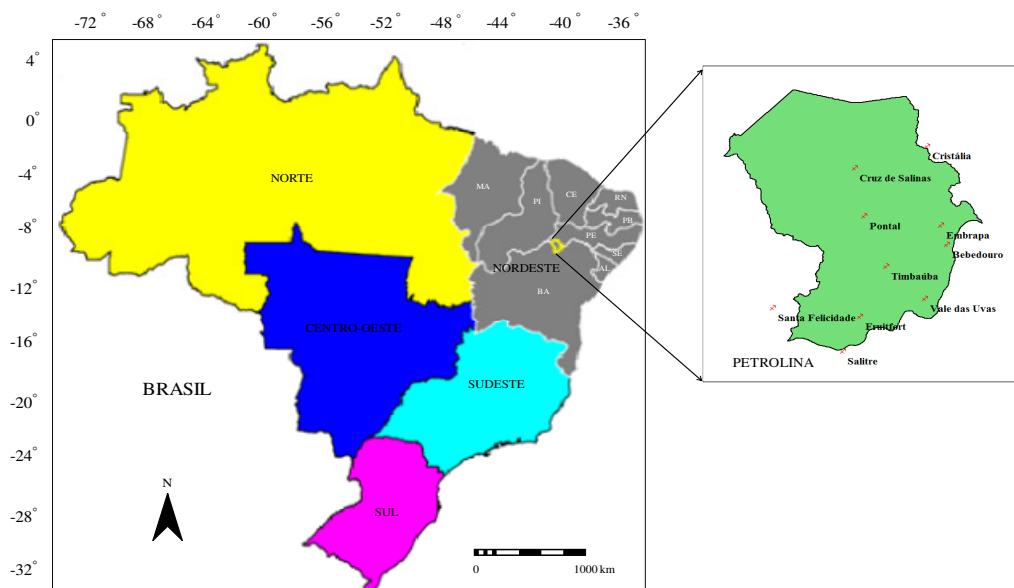


Figura 1. Localização do município de Petrolina, Estado de Pernambuco (PE), Nordeste do Brasil, e as estações agrometeorológicas utilizadas.

Imagens MODIS foram usadas sendo 7 de 2010 e 3 de 2011 em conjunto com uma rede de 15 estações, com aplicação de equações calibradas com dados de campo durante os anos de

2002 e 2004 (Teixeira et al., 2008) seguidas de processos de interpolação. Os dados de campo foram usados para a obtenção de coeficientes de regressão para as equações do albedo (α_0) e temperatura (T_0) da superfície em larga escala.

MODIS é um sensor a bordo da plataforma Terra, com 36 bandas espectrais, adquiridas em três resoluções espaciais (250, 500 e 1000m). Para o cálculo de α_0 os valores de reflectância das bandas 1 e 2 com resolução espacial de 250m foram usados de acordo com Valiente et al. (1995):

$$\alpha_0 = a + b\alpha_{p(1)} + c\alpha_{p(2)} \quad (1)$$

onde $\alpha_{p(1)}$ e $\alpha_{p(2)}$ são os albedos planetários nas bandas 1 e 2 medidas pelo sensor MODIS e a, b e c são coeficientes de regressão obtidos comparando-se estas medições com dados de campo descritos em Teixeira et al. (2008). Os valores destes coeficientes encontrados para as condições semiáridas brasileiras foram de 0,08, 0,41 e 0,14, respectivamente.

Para a obtenção de T_0 , as bandas termais 31 e 32 com resolução espacial de 1000m foram usadas. Uma regressão simples baseada na comparação da temperatura aerodinâmica obtida nos mesmos experimentos de campo para α_0 (Teixeira et al., 2008) e na temperatura radiométrica medida pelo satélite foi usada:

$$T_0 = aT_{31} + bT_{32} \quad (2)$$

onde T_{31} e T_{32} são as temperaturas de brilho para as bandas 31 e 32 e os coeficientes de regressão foram igualmente 0,50 para as condições semiáridas brasileiras.

O NDVI foi também obtido através das bandas 1 e 2 pela aplicação da seguinte equação:

$$NDVI = \frac{\alpha_{p(2)} - \alpha_{p(1)}}{\alpha_{p(2)} + \alpha_{p(1)}} \quad (3)$$

Com as imagens de α_0 , T_0 e NDVI, o algoritmo SAFER foi aplicado para o cálculo da evapotranspiração atual (ET) através da equação:

$$\frac{ET}{ET_0} = \exp \left[a + b \left(\frac{T_0}{\alpha_0 NDVI} \right) \right] \quad (4)$$

onde ET_0 é a evapotranspiração de referência calculada pelo método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) com os valores sendo interpolados e a e b são os coeficientes de regressão, os quais foram 1,9 e 0,008 para as condições semiáridas brasileiras respectivamente (Teixeira, 2012a).

Os valores diários do saldo de radiação R_n foram obtidos pelos valores do saldo de radiação de ondas curtas (R_{ns}) na mesma escala de tempo, aplicando-se um termo para o saldo de radiação de ondas longas (R_{nl}), através da equação de Slob:

$$R_n = (1 - \alpha_0)RS \downarrow - a_l \tau_s \quad (5)$$

onde a_l é um coeficiente de regressão da relação entre R_{nl} e a transmissividade atmosférica de ondas curtas (τ_s) que por outro lado, segundo Teixeira et al. (2008) foi correlacionado com os dados de temperatura do ar (T_a)

$$a_l = bT_a - c \quad (6)$$

onde os coeficientes b e c encontrados para as condições semiáridas do Brasil foram, respectivamente, 7 e 39,99.

Transformando ET em unidades de energia, o fluxo de calor latente (λE) foi obtido, e o fluxo de calor sensível (H) estimado como resíduo no balanço de energia, negligenciando o fluxo de calor no solo (G) para o período de 24 horas.

$$H = R_n - \lambda E \quad (7)$$

Para separação dos componentes do balanço de energia, o modelo elaborado por Teixeira (2012b) para a resistência da superfície aos fluxos hídricos (r_s) foi usado:

$$r_s = \exp \left[a \left(\frac{T_0}{\alpha_0} \right) (1 - NDVI) + b \right] \quad (8)$$

onde os coeficientes de regressão a e b para as condições semiáridas brasileiras foram de -0,04 e 2,72, respectivamente.

3. Resultados e Discussão

Como para análises dos componentes do balanço de energia ao longo do ano, imagens MODIS de 2010 e 2011, e considerando que a partição da energia disponível é dependente das condições termo-hidrológicas, os comportamentos mensais dos totais da precipitação (P) e médias da radiação solar incidente ($RS \downarrow$) ao longo destes anos são apresentados na Figura 2, com dados da estação Timbaúba (ver Figura 1), situada no município de Petrolina (PE), Nordeste do Brasil.

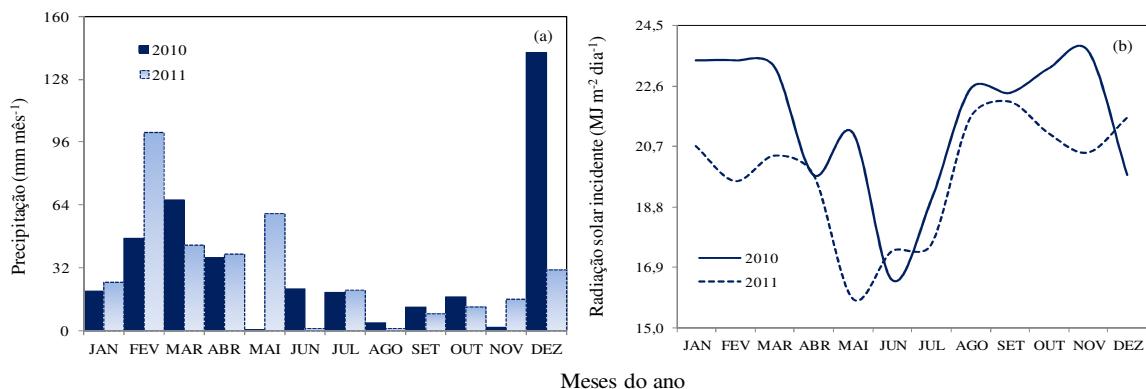


Figura 2. Tendência dos totais de precipitação (P) e dos valores médios mensais da radiação solar incidente ($RS \downarrow$), ao longo dos anos de 2010 e 2011, na estação Timbaúba, situada no município de Petrolina (PE), Nordeste do Brasil.

Com relação a P (Figura 2a), percebe-se a concentração das maiores mensais no período de fevereiro a abril, representando de 40 a 50% dos totais anuais. No período seco de junho a outubro ocorre redução das chuvas tornando a aumentar novamente a partir do mês de outubro. Os totais anuais foram similares, com o ano de 2010 apresentando-se 7% superior a 2011, não usualmente maior, no mês de dezembro. Considerando-se os valores médios de $RS \downarrow$ (Figura 2b), embora as tendências ao longo dos anos sejam similares, valores 8% maiores são observados para 2010 que para 2011. Destaca-se o mês de novembro como de maiores taxas de $RS \downarrow$, devido ao efeito conjunto da posição zenital do Sol com condições de baixa nebulosidade. Como resultado de condições termo-hídricas maiores, o ano de 2010 é favorecido por uma maior produção de biomassa em relação ao ano de 2011.

A Figura 3 apresenta os parâmetros obtidos por sensoriamento remoto com o sensor MODIS, relacionados ao balanço de energia em larga escala para diferentes períodos do ano de 2010, com diferentes condições termo-hídricas, no município de Petrolina (PE), Nordeste do Brasil. São abordados os períodos envolvendo o término do período chuvoso (Dia/Ano 120/2010, no final de abril); as condições mais secas (Dia/Ano 251/2010, no início de setembro) e o começo da estação chuvosa (Dia/Ano 312/2010, início de novembro).

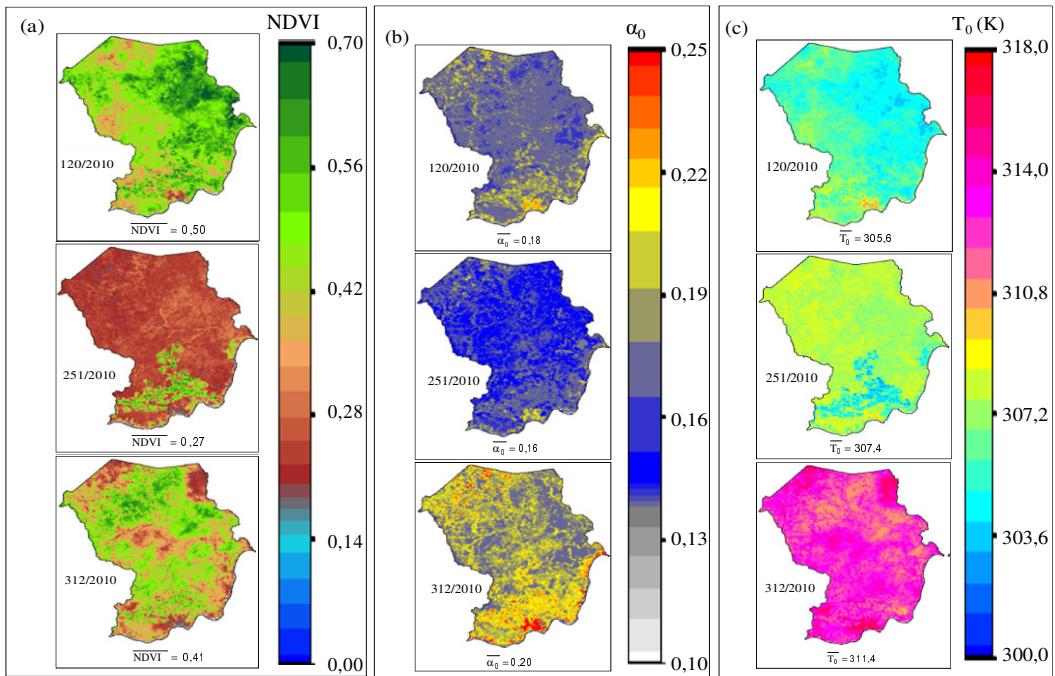


Figura 3. Distribuição espacial dos parâmetros obtidos por sensoriamento remoto relacionados ao balanço de energia em larga escala, no município de Petrolina, Estado de Pernambuco (PE), Nordeste do Brasil, para cada dia do ano (Dia/Ano) envolvendo diferentes condições termo-hidrológicas. (a) NDVI; (b) albedo da superfície (α_0); e (c) temperatura da superfície (T_0). As barras significam médias dos pixels.

A diferenciação dos valores de NDVI (Figura 3a) é evidente ao longo do ano, com maior distinção entre culturas irrigadas e vegetação natural nas condições mais secas em julho (Day/Ano 251/2010). A heterogeneidade espacial é maior no mês de Novembro (Dia/Ano 312/2010) devido ao fato que as espécies naturais (Caatinga) começam a usar a água das primeiras chuvas, causando um incremento rápido da biomassa nestas espécies, concomitantemente com culturas irrigadas. Por outro lado, uma menor variação pixel a pixel é constatada em abril (Dia/Ano 120/2010) quando após o período chuvoso, o solo está uniformemente úmido na zona das raízes da mistura de agros-ecossistemas.

Maiores valores de α_0 são observados em novembro (Dia/Ano 312/2010), enquanto que os menores acontecem em setembro (Dia/Ano 251/2010) devido ao fato da variação da posição do Sol ao longo do ano, acarretando em diferentes níveis de $RS\downarrow$. Ainda, os valores de α_0 dependem também das condições de umidade do solo (Teixeira, 2008), como observa-se uma redução dos valores médios em abril (Day/Ano 120/2010) comparando-se com o mês de novembro (Figura 3b), períodos próximo da posição zenital em Petrolina (PE).

T_0 afeta a energia disponível interferindo no balanço de radiação de ondas longas, apresentando-se com valores menores nas áreas irrigadas quando comparadas com aquelas sem irrigação (Figura 3c), porém não distinguindo as culturas irrigadas da vegetação natural tão bem quanto o NDVI, o que pode ser explicado devido as diferentes resoluções espaciais nas faixas do visível e termal. Em geral, os valores mais elevados ocorrem no período de maior $RS\downarrow$ (Dia/Ano 312/2010, novembro) e os menores após o período chuvoso (Dia/Ano 120/2010, abril).

A Figura 4 apresenta os componentes do balanço de energia ao longo do ano na escala diária no município de Petrolina (PE), Nordeste do Brasil. Devido a carência de imagens MODIS com ausência de nuvens, para cobrir todas as condições termo-hidrológicas ao longo do ano, 3 imagens para o ano de 2011 foram adicionadas com 7 do ano de 2010 para cobrir o comportamento da partição da energia disponível ao longo do ano.

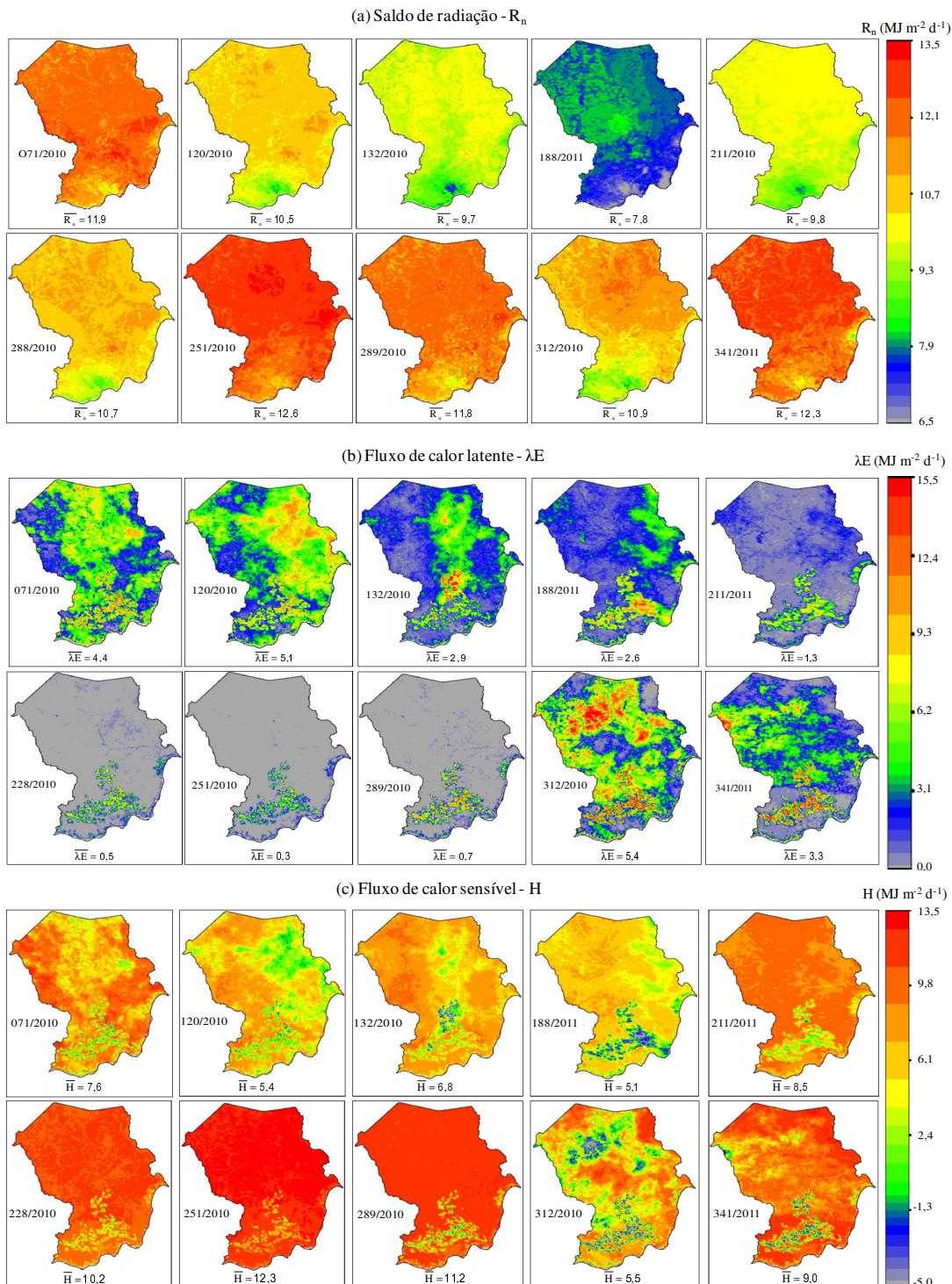


Figura 4. Distribuição especial dos componentes do balanço de energia em larga escala, no município de Petrolina, Estado de Pernambuco (PE), Nordeste do Brasil para cada dia do ano (Dia/Ano). (a) saldo de radiação (R_n); (b) fluxo de calor latente (λE); e (c) fluxo de calor sensível (H). As barras significam médias dos pixels.

De acordo com a Figura 4a, em geral não há uma forte distinção entre os valores de R_n provenientes das culturas irrigadas e das espécies da Caatinga. Também não se constata grande variação espacial na energia disponível, com o desvio padrão (DP) nos valores espaciais de R_n variando de $0,36 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Dia/Ano 211/2011, Abril) a $0,75 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

(Dia/Ano 211/2010, Novembro), evidenciando-se uma forte dependência de R_n com os níveis de $RS\downarrow$ (ver Figuras 2 e 4a).

Claramente podem-se distinguir as áreas irrigadas das espécies da Caatinga pelos mais altos valores de λE (Figura 4b) e mais baixos de H (Figure 4c) no primeiro tipo de vegetação. H apresenta-se até mesmo negativo em algumas ocasiões nas áreas com irrigação, evidenciando advecção de calor proveniente das áreas mais quentes nas vizinhanças das parcelas irrigadas. Isto acontece mais notadamente em julho (Dia/Ano 188/2011), na época do solstício de inverno do hemisfério Sul (Figura 4c).

Considerando o município de Petrolina como um todo, os maiores valores de λE são para o mês de novembro (Dia/Ano 312/2010), em média $5,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, devido ao efeito conjunto de início das chuvas e maior demanda atmosférica. Por outro lado em setembro (Dia/Ano 251/2010), H apresenta-se com seus maiores valores, em média $12,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, devido às baixas condições de umidade e contínuo aquecimento da superfície acompanhando o movimento aparente do Sol. Com relação à variação espacial, os meses de novembro e abril (início e final do período chuvoso, respectivamente) se destacam como os de maiores valores com DP em torno de $3,7$ e de $2,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectivamente, para ambos os fluxos de energia.

Considerando-se a classificação em culturas irrigadas (CI) e vegetação natural (VN) os valores médios da razão de $RS\downarrow$ para R_n e a partição da energia disponível em λE e H são apresentados para as diferentes condições ao longo do ano na Figura 5.

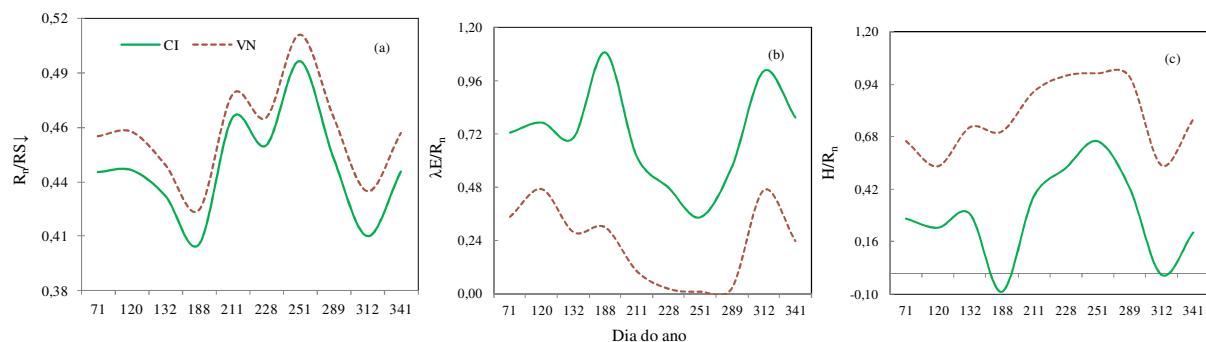


Figura 5. Variação das médias da partição da radiação solar incidente para o saldo de radiação ($R_n/RS\downarrow$) e a partição deste saldo em fluxo de calor latente ($\lambda E/R_n$) e sensível (H/R_n) ao longo do ano no município de Petrolina, Estado de Pernambuco (PE), Nordeste do Brasil.

A média da razão $R_n/RS\downarrow$ (Figura 5a) variou entre 0,40 (Dia/Ano 188/2011/ julho) a 0,51 (Dia/Ano 251/2010/setembro), correspondendo respectivamente aos período após as chuvas e mais seco do ano. Entretanto a diferença nos valores entre culturas irrigadas e vegetação natural foi de apenas 1%, em média.

Com relação às parcelas da energia disponível utilizada como λE , percebem-se claramente da Figura 5b os valores bem mais elevados para as culturas irrigadas que para as espécies da Caatinga. Nas condições de irrigação, o maior valor de $\lambda E/R_n$ ocorre em julho (Dia 188), apresentando um novo pico em novembro (Dia 312), ocasiões em que há maior advecção de calor das áreas de vegetação natural para as parcelas irrigadas, com λE sendo em média respectivamente 9 e 1% maior que R_n . O comportamento de H/R_n ao longo do ano apresenta o comportamento oposto ao de $\lambda E/R_n$ (Figura 5c), com valores maiores para a vegetação natural que para cultura irrigadas. Nos meses de agosto a outubro (Dias 228, 251 e 289) H chega a representar 98% de R_n e a atuar como uma fonte adicional de energia nos meses de julho e novembro para o consumo hídrico das culturas irrigadas.

Considerando as diferentes condições termo-hídricas ao longo do ano em Petrolina (PE), em média as razões $R_n/RS\downarrow$, $\lambda E/R_n$ e H/R_n foram respectivamente de 0,44, 0,71 e 0,29 para

culturas irrigadas, enquanto que para vegetação natural as taxas correspondentes foram de 0,46, 0,22 e 0,78.

4. Conclusões

O uso conjunto de sensoriamento remoto e estações agrometeorológicas permitiu a quantificação e análises dos componentes do balanço de energia diário em larga escala ao longo do ano, no município de Petrolina (PE), Nordeste do Brasil. O saldo de radiação é mais fortemente condicionado pelas condições de radiação solar do que pelas características dos diferentes tipos de vegetação. Foi demonstrado que os fluxos diários de calor latente e sensível podem ser estimados a partir de medições instantâneas das radiações nas faixas do visível e termal do sensor MODIS, através da modelagem da razão da evapotranspiração atual para a de referência no momento da passagem do satélite. As frações médias do saldo de radiação para os fluxos de calor latente e sensível foram de 71 e 22% e 29 e 78%, considerando-se, respectivamente, culturas irrigadas e vegetação natural. Em algumas ocasiões nas áreas com irrigação, evidenciando-se, em alguns casos, fluxos de calor proveniente das vizinhanças das parcelas irrigadas. Estas análises podem contribuir o monitoramento dos efeitos das mudanças de uso da terra e climáticas.

Agradecimentos

Ao CNPq pelo suporte financeiro ao projeto sobre produtividade da água, processo 472973/2011-8.

5. Referências bibliográficas

- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*; Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- Cleugh, H.A.; Leuning, R.; Mu, Q., Running, S.W. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v.106, p.285-304, 2007.
- Miralles, D.G.; Holmes, T.R.H.; De Jeu, R.A.M.; Gash, J.H.; Meesters, A.G.C.A.; Dolman, A.J. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, p. 453-469, 2011.
- Tang, Q.; Rosemberg, E.A; Letenmaier, D.P. Use of satellite data to assess the impacts of irrigation withdrawals on Upper Klamath Lake, Oregon. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 13, p. 617-627, 2009.
- Teixeira, A.H. de C.; Bastiaanssen, W.G.M.; Ahmad, M.D.; Moura, M.S.B.; Bos, M.G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**, v.362, p.110-127, 2008.
- Teixeira, A. H. de C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1287-1319, 2010.
- Teixeira, A.H. de C. Modelling evapotranspiration by remote sensing parameters and agro-meteorological stations. In: Neale, C.M.U.; Cosh, M.H. (Org.). **Remote Sensing and Hydrology**. IAHS Press, 2012a. 352, p. 154-157.
- Teixeira, A.H. de C. Determination of surface resistance to evapotranspiration by remote sensing parameters in the semi-arid region of Brazil for land-use change analyses. In: Neale, C.M.U.; Cosh, M.H. (Org.). **Remote Sensing and Hydrology**. IAHS Press, 2012b. 352, p. 167-170.
- Valiente, J.A.; Nunez, M.; Lopez-Baeza, E.; Moreno, J. F. Narrow-band to broad-band conversion for Meteosat visible channel and broad-band albedo using both AVHRR-1 and -2 channels. **International Journal of Remote Sensing**, v. 16, p.1147-1166, 1995.