

SAZONALIDADE DE VARIÁVEIS BIOFÍSICAS EM REGIÕES SEMIÁRIDAS PELO EMPREGO DO SENSORIAMENTO REMOTO

JOSEILSON O. RODRIGUES¹, EUNICE M. DE ANDRADE²,
ADUNIAS DOS S. TEIXEIRA³, BERNARDO B. DA SILVA⁴

RESUMO: Para investigar alterações no albedo, no Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), no saldo de radiação e no fluxo de calor no solo, em decorrência do regime pluviométrico no semiárido cearense, desenvolveu-se um estudo na bacia do Rio Trussu - Ceará, empregando-se sensoriamento remoto. Foram utilizadas duas imagens Landsat 7 ETM+, datadas de 25-10-2000 e 24-7-2001, sendo as variáveis estimadas pelo emprego do algoritmo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithms for Land*). Os resultados mostraram que as variáveis investigadas apresentaram alterações entre as duas estações, sendo os maiores valores de albedo registrados na estação seca. O NDVI apresentou maior sensibilidade ao regime hídrico, mostrando alto potencial de recuperação da vegetação ao efeito da precipitação. As margens do Rio Trussu apresentaram NDVI superior a 0,39, sendo indicativo de preservação da mata ciliar. A vegetação da bacia mostrou alto poder resiliente expresso pelo incremento nos valores de NDVI para o ano de 2001. A estação chuvosa exerceu também influência marcante sobre o saldo de radiação e fluxo de calor no solo, confirmando o efeito da estação climática na modificação do balanço de energia sobre a bacia.

PALAVRAS-CHAVE: albedo, NDVI, sensoriamento remoto, saldo de radiação.

BIOPHYSICS VARIABLES SEASONALITY ON SURFACE IN SEMIARID REGIONS BY USING REMOTE SENSING

ABSTRACT: To investigate the rainfall regime effects over the albedo, NDVI (*normalized difference vegetation index*), net radiation and soil heat flux in a semiarid region (Northeast of Brazil), a study in the Trussu watershed was developed by using remote sensing. The study focuses on two images (Landsat 7 ETM+) provided by Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), from October 25, 2000 and July 24, 2001, each of them having a different rainfall regime (dry and wet seasons). The images were analyzed by using the SEBAL algorithm (*surface energy balance algorithm for land*). The results showed that the amount of rainfall affected the investigated variables, and the highest values of albedo were registered during the dry season. The NDVI presented high sensibility to rainfall regime, pointing out a high vegetation potential recover during the rainfall season. The NDVI along the Trussu River was up to 0.39, expressing the repair zone preservation. The watershed vegetation showed a high resilience power expressed by NDVI values in the year of 2001. Net radiation and soil heat flux were greater in the dry season, in this way expressing the effect of humidity on the energy balance.

KEYWORDS: albedo, NDVI, remote sensing, net radiation.

INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto tem assumido um papel importante no monitoramento e na estimativa dos diversos fenômenos meteorológicos e ambientais, servindo de suporte para monitoramento das mudanças climáticas e possibilitando a tomada de decisão para preservação

¹ Eng^o Agrônomo, Mestre em Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, UFC, Fortaleza - CE, Fone (0XX85) 3366.9762, wilson_agronomia@hotmail.com

² Eng^a Agrônoma, Ph.D., Professora do Departamento de Engenharia Agrícola, UFC, Fortaleza - CE.

³ Eng^o Agrônomo, Ph.D., Professor do Departamento de Engenharia Agrícola, UFC, Fortaleza - CE.

⁴ Meteorologista, D.Sc. em Engenharia Civil, Pós-Dr. em Micrometeorologia, Professor do Departamento de Ciências Atmosféricas, UFPA, Campina Grande - PB.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 12-11-2008

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 28-8-2009

ambiental (MOREIRA, 2003). Nesse contexto, pesquisadores como BASTIAANSEN (2000) e WANG & DAVIDSON (2007) vêm empregando técnicas de sensoriamento remoto no processo de gestão e de preservação dos recursos naturais.

Na última década, surgiram vários algoritmos de aplicabilidade em sensoriamento remoto, dentre os quais o SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land), que é um algoritmo semi-empírico que promove a parametrização do balanço de energia e fluxos da superfície baseado em alguns dados locais e medições espectrais de satélites (SILVA et al., 2005a). Esse algoritmo foi desenvolvido inicialmente por BASTIAANSEN (1995) e validado em diferentes ecossistemas do globo (BASTIAANSEN et al., 1998). Por meio dele, torna-se possível a estimativa de parâmetros essenciais ao monitoramento da degradação ambiental, como: albedo, NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e demais componentes do balanço de energia.

Esses componentes vêm sendo empregados em estudos ambientais por pesquisadores como OGUNTUNDE et al. (2006), IZIOMON & MAYER (2002), uma vez que os mesmos permitem a identificação e a caracterização das alterações da superfície em bacias hidrográficas, seja por processos naturais, seja por antrópicos. O NDVI é uma variável que vem sendo bastante empregada na estimativa de áreas secas, e está intimamente correlacionado a variáveis climáticas da região (BARBOSA et al., 2006). Variações na dinâmica da vegetação têm sido de grande importância em regiões semiáridas, não somente em averiguações sobre alterações no cenário de bacias hidrográficas, como também em estudos de modelagem climática; por ser a Caatinga um bioma de elevada vulnerabilidade, qualquer alteração, seja de caráter antrópico, seja natural, pode culminar em significativos impactos nos ecossistemas ali presentes (GURGEL et al., 2003; BARBOSA et al., 2006).

A bacia do Rio Trussu, situado no semiárido do Nordeste, onde prevalece a vegetação de Caatinga, passou, em décadas recentes, por grandes modificações em sua paisagem, marcada, sobretudo, por alterações de caráter antrópico, principalmente pela criação extensiva de gado bovino, pelas práticas de extração madeireira e pelo plantio de algodão, provocando alterações no cenário natural da bacia (PALÁCIO, 2004).

Tomando-se por base o emprego crescente do sensoriamento remoto nos recursos naturais, desenvolveu-se este trabalho com o objetivo de investigar a variação temporal do albedo, do NDVI, do saldo de radiação e do fluxo de calor no solo sobre a bacia hidrográfica do Rio Trussu, decorrente da sazonalidade climática.

MATERIAL E MÉTODOS

Características da área de estudo

A bacia do Rio Trussu está localizada na bacia do Alto Jaguaribe, entre as coordenadas geográficas 5°57'36" S a 6°26'24" S e longitudes 39°25'48" W a 39°53'24" W (Figura 1), com área de 1.568,4 km². O clima da região é do tipo BSw'h', clima semiárido, com precipitações pluviométricas máximas de outono, e temperatura média mensal sempre superior a 18 °C. A evapotranspiração potencial da região é de 2.900 mm ano⁻¹, e o total médio anual da precipitação pluviométrica, de 750 mm.

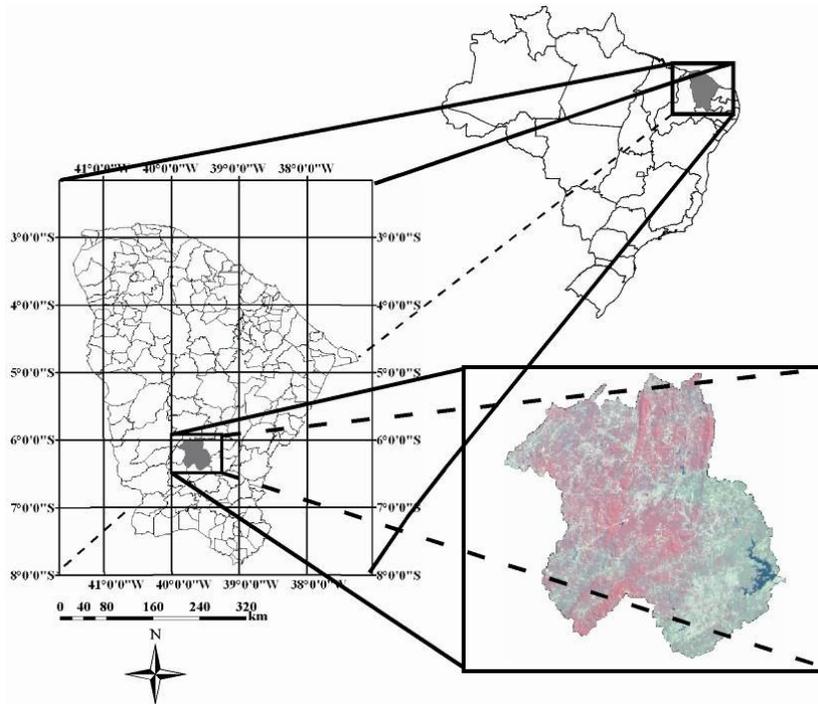


FIGURA 1. Localização da bacia hidrográfica do Trussu - CE, na região Nordeste do Brasil.
Location of the Trussu watershed in the Northeast region of Brazil.

A estação chuvosa da região inicia-se em janeiro e estende-se até julho, ocasião em que a vegetação se encontra ainda abundante devido à precipitação pluviométrica acumulada dos meses anteriores, podendo, assim, o mês de julho ser considerado quanto ao caráter de vegetação, representativo da estação. Devido à condição caducifólia da vegetação de Caatinga, a cobertura vegetal da bacia hidrográfica sofre várias modificações a partir de julho, em que se inicia a estação seca, sendo o mês de outubro um dos meses de menores alturas pluviométricas (Figura 2), podendo esse ser considerado representativo da estação seca da região. As alturas pluviométricas mensais do período investigado, anos de 2000 e 2001, bem como a série histórica estão presentes na Figura 2, na qual se evidencia maior concentração de chuvas nos meses de fevereiro, março e abril, característica das regiões semiáridas do Nordeste brasileiro. Os solos predominantes na região são os Neossolos flúvicos de textura pesada, circundados por encostas de topografia suave, onde se encontram os Argissolos (COTEC, 1989).

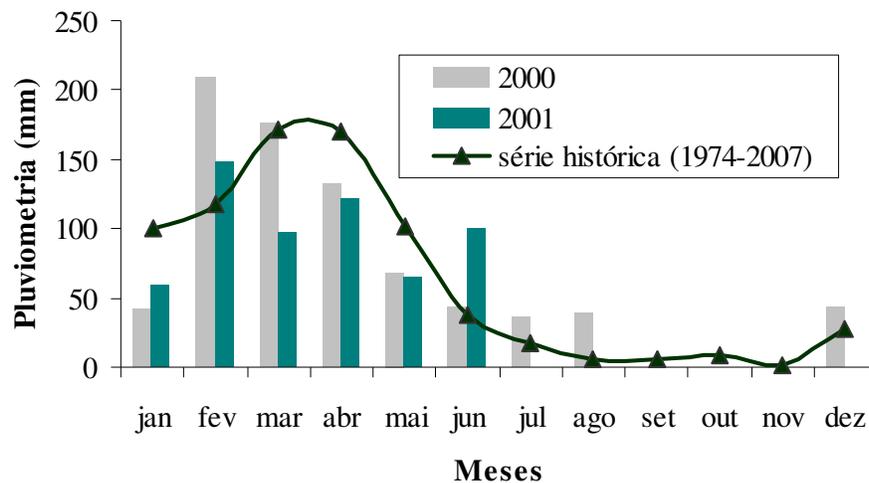


FIGURA 2. Dados pluviométricos da bacia para os anos de estudo (posto Trussu/Acopiara).
Watershed pluviometric data in the investigated years (station Trussu/Acopiara).

Aquisição e tratamento dos dados

As duas imagens utilizadas foram geradas pelo sensor ETM+ a bordo do satélite LANDSAT 7, compreendendo a órbita/ponto 217/64 e liberadas pela Divisão de Geração de Imagens (DGI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A primeira datava de 25-10-2000 (dia Juliano = 299), sendo essa representativa da estação seca, e a segunda, de 24-7-2001 (dia Juliano = 205), abrangendo o final da estação chuvosa. Com base nas duas imagens, foi possível avaliar as mudanças que podem ocorrer nas variáveis biofísicas: albedo, NDVI e componentes do balanço de energia, saldo de radiação e fluxo de calor no solo, em decorrência da estação seca ou chuvosa, em regiões semiáridas do Ceará.

Antes de iniciar o processo de tratamento digital de imagens propriamente dito, realizou-se um pré-processamento, que consiste de empilhamento das bandas, recorte e correções geométricas, processos esses extremamente necessários para a melhoria da qualidade dos dados (VERSIANI & RODRIGUES, 2007). A estimativa das variáveis estudadas foi efetuada utilizando-se do software ERDAS IMAGINE 8.5.

O saldo de radiação à superfície (R_n) foi obtido pela eq.(1), que calcula o balanço de radiação na superfície; as demais equações que seguem, foram empregadas na determinação de seus parâmetros.

$$R_n = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_o) R_{L\downarrow} \quad (1)$$

em que,

- $R_{s\downarrow}$ - radiação de onda curta incidente;
- α - albedo corrigido do *pixel*;
- $R_{L\downarrow}$ - radiação de onda longa emitida pela atmosfera;
- $R_{L\uparrow}$ - radiação de onda longa emitida pelo *pixel*, e
- ϵ_o - emissividade do *pixel*.

As densidades de fluxo $R_{s\downarrow}$, $R_{L\downarrow}$, $R_{L\uparrow}$ e R_n são expressas em $W m^{-2}$.

A radiância espectral dos canais (1; 2; 3; 4; 5 e 7) foi estimada pela eq.(2) proposta por MARKHAM & BAKER (1987):

$$L_{\lambda_i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} ND \quad (2)$$

em que,

- L_{λ_i} - radiância espectral da *i*-ésima banda, $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$;
- a_i e b_i - coeficientes de calibração de cada banda, $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$;
- i* - bandas (1, 2, ..., 7) do Landsat 7, e
- ND - número digital de cada *pixel* na imagem (ALLEN et al., 2002).

O albedo da superfície foi obtido pela eq.(3):

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{sw}^2} \quad (3)$$

em que,

- α_{toa} - albedo no topo da atmosfera;
- α_p - radiação solar refletida pela atmosfera, e
- τ_{sw} - transmissividade atmosférica.

No caso do algoritmo SEBAL, o valor considerado para α_p foi de 0,03 (SILVA et al., 2005b), enquanto a transmissividade, segundo ALLEN et al. (2002), pôde ser estimada por:

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} z \quad (4)$$

em que,

z - altitude de cada *pixel*.

Para este estudo, utilizou-se do modelo de elevação digital do terreno (DEM) da bacia do Trussu, a partir de dados do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução do *pixel* igual ao do recorte da imagem (30 x 30 m).

O albedo no topo da atmosfera foi computado de acordo com a eq.(5):

$$\alpha_{toa} = 0,293\rho_1 + 0,274\rho_2 + 0,233\rho_3 + 0,157\rho_4 + 0,033\rho_5 + 0,011\rho_7 \quad (5)$$

em que,

ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 , ρ_4 , ρ_5 e ρ_7 - refletâncias monocromáticas das bandas 1; 2; 3; 4; 5 e 7, respectivamente.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Índice de Vegetação Ajustado aos Efeitos do Solo (SAVI) e o Índice de Área Foliar (IAF) foram computados pelas seguintes relações (ALLEN et al., 2002):

$$NDVI = \frac{\rho_{iv} - \rho_v}{\rho_{iv} + \rho_v} \quad (6)$$

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{iv} - \rho_v)}{(L + \rho_{iv} + \rho_v)} \quad (7)$$

$$IAF = \frac{-\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (8)$$

em que,

ρ_{iv} - refletância da banda 4 (infravermelho próximo);

ρ_v - refletância da banda 3 (vermelho), e

L - constante que varia com a cobertura do solo.

Para as condições de vegetação aberta, frequentemente se usa 0,5 (DI PACE et al., 2008).

A emissividade é uma característica do corpo e mede sua maior ou menor tendência em emitir radiação, podendo variar com comprimento de onda. No SEBAL, duas emissividades são empregadas: a primeira é a emissividade representativa do domínio da banda termal com comprimento de onda entre 10,4 a 12,5 μm (domínio espectral estreito), expressa como ϵ_{NB} (*narrow band*); a segunda é a emissividade representativa no domínio espectral largo (6 a 14 μm), expressa por ϵ_0 . A emissividade de cada *pixel* na banda termal (ϵ_{NB}) foi obtida em função do índice de área foliar, conforme descrito por ALLEN et al. (2002), cuja validade se dá para valores de $IAF < 3$, enquanto para $IAF > 3$, considerou-se $\epsilon_{NB} = 0,98$.

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,00331 IAF \quad (9)$$

Para o cálculo da emissividade de cada “*pixel*” no domínio espectral largo, empregou-se a eq.(10), sendo válida para $IAF < 3$. Em situações de $IAF \geq 3$, assumiu-se $\epsilon_0 = 0,98$.

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01 IAF \quad (10)$$

A temperatura da superfície (T_s), em Kelvin, foi estimada em função da temperatura de brilho, que corresponde à radiância registrada pelo sensor do satélite e calculada pela inversão da função de Planck (SOUZA & SILVA, 2005), e pela emissividade (ε_{NB}) da banda 6, por meio da eq.(11). No algoritmo SEBAL, essa equação representa uma aproximação dos valores reais de T_s , apresentando limitação por desconsiderar os efeitos atmosféricos sobre a temperatura.

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda 6}} + 1\right)} \quad (11)$$

em que,

K_1 e K_2 - constantes que, para ETM+ Landsat 7, são iguais a $666,09 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ e $1282,71 \text{ K}$, respectivamente (ALLEN et al., 2002).

A radiação de onda longa emitida para cada *pixel* ($R_{L\uparrow}$) e a radiação de ondas longas incidentes emitida pela atmosfera em direção à superfície ($R_{L\downarrow}$) foram obtidas utilizando a constante de Stefan-Boltzmann:

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_o \sigma T_s^4 \quad (12)$$

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (13)$$

em que,

σ - constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$;

T_a - temperatura absoluta do ar (K), considerou-se, neste estudo, a temperatura média diária para os dias da passagem do satélite (25-10-2000 e 24-7-2001), sendo os dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), e

ε_a - emissividade atmosférica (BASTIAANSEN, 1995), obtida por:

$$\varepsilon_a = 0,85 (-\ln \tau_{sw}) 0,99 \quad (14)$$

A radiação de ondas curtas incidentes ($R_{S\downarrow}$) foi estimada pela eq.(15):

$$R_{S\downarrow} = S \cos Z d_r \tau_{sw} \quad (15)$$

em que,

S - constante solar (1.367 W m^{-2}), e

Z - ângulo zenital solar.

O fluxo de calor no solo G (W m^{-2}) foi calculado a partir da equação empírica desenvolvida por BASTIAANSEN (2000):

$$G = [(T_s - 273)(0,0038 + 0,0074\alpha, (1 - 0,98\text{NDVI}^4))] R_n \quad (16)$$

em que,

T_s - temperatura da superfície, °C, e

α - albedo corrigido do *pixel*.

Para a correção de valores do fluxo de calor no solo para corpos d'água ($\text{NDVI} < 0$), considerou-se $G = 0,3R_n$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nas duas imagens, foi possível avaliar as mudanças que ocorreram no albedo, no NDVI, no saldo de radiação e no fluxo de calor no solo, em decorrência da estação seca ou chuvosa,

no semiárido cearense. Por ser o albedo um parâmetro biofísico em que a sua variação ocorre de acordo com o tipo de alvo sobre o qual incide a radiação eletromagnética, variações desse parâmetro são, pois, excelente indicador de mudanças no cenário de uma bacia hidrográfica (SILVA et al., 2005b). Os valores de albedo no mês de outubro de 2000 variaram de 0,03 a 0,68 (Figura 3 A). Os altos valores de albedo (cor vermelha) na parte norte da bacia representam nuvens, cujos valores de albedos se situaram entre 0,36 e 0,68 e representam o percentual de 0,4% da área da imagem, sendo, portanto, um percentual pequeno e que não compromete a interpretação dos resultados. As manchas azuis, simétricas às vermelhas ao norte e no centro da bacia, representam sombras de nuvens, cujo comportamento espectral se assemelha ao de corpos hídricos.

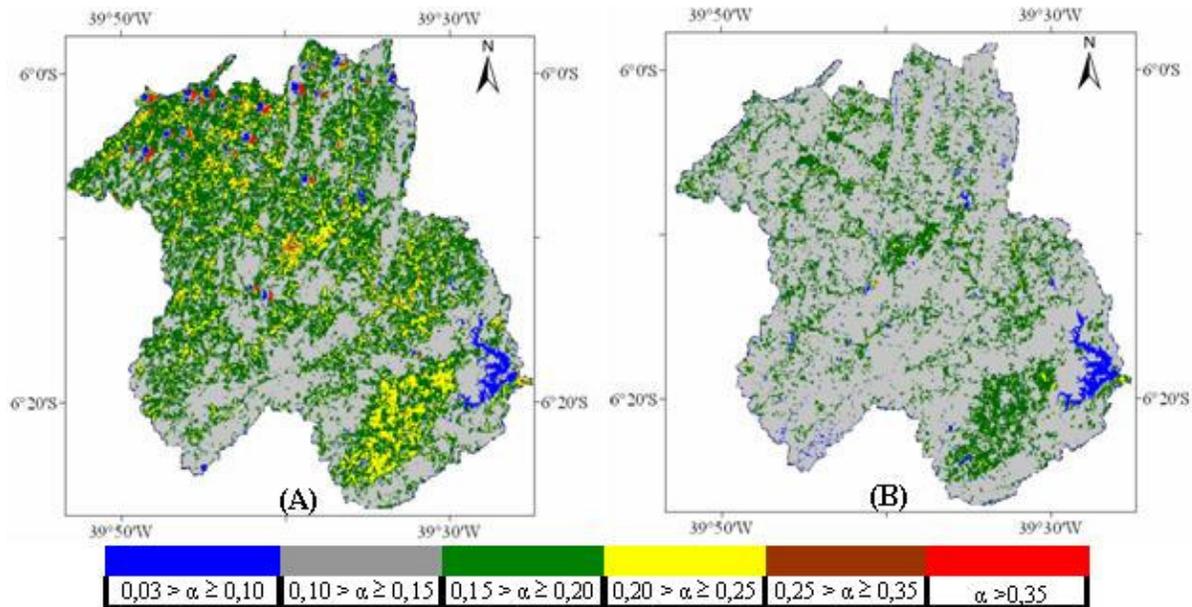


FIGURA 3. Albedo de superfície (α) para a bacia do Trussu - CE, em outubro de 2000 (A) e julho de 2001 (B). **Surface albedo (α) of the Trussu watershed - CE in October 2000 (A) and July 2001 (B).**

Aproximadamente 43,8% da região estudada para a estação seca (Figura 3A) apresentou albedo de 0,10 a 0,15. Esse albedo é indicador de cobertura vegetal, como apresentado por (OGUNTUNDE et al., 2006). Essas áreas correspondem, em sua maioria, aos pontos de maior elevação na bacia (altitude > 600 m), onde se encontram os cumes das elevações. As áreas em azul representam corpos hídricos com valores de 3 a 10% de albedo (MOREIRA, 2003). Os baixos valores nos corpos hídricos indicam a presença de águas limpas, com pouca carga de sedimentos em suspensão; isso fica constatado em vários setores do reservatório Trussu, em que as águas mostraram valores de albedo inferiores a 4%. Essa baixa carga de sedimento em suspensão é decorrente da época do ano (estação seca) e da hidrografia da região, que é composta por cursos de regime intermitente ou efêmero. Durante a estação seca, a descarga dos tributários do reservatório do Trussu é zero, portanto não ocorre adição de sedimentos ao reservatório, o que torna suas águas com alta capacidade de penetração pela luz, reduzindo, assim, o percentual refletido. Pesquisadores como SILVA et al. (2005b) estimaram albedos na ordem de 9 a 12% em mananciais, nos municípios de Petrolina - PE, e Juazeiro - BA.

Aproximadamente 14% da área total apresentou albedos variando de 0,26 a 0,36, indicativo de zonas desprotegidas, tipicamente encontradas em regiões semiáridas. OGUNTUNDE et al. (2006), pesquisando o efeito da umidade da superfície do solo sobre alterações nos valores de albedos, constataram albedos de 0,28 - 0,29 para solos descobertos e em condições de baixa umidade. A segunda maior porção da área, aproximadamente 40,16% do território, demonstrou valores de albedo entre 0,15 e 0,20 (Figura 3A).

Em mais de 3/4 da imagem (Figura 3B) representativa da estação chuvosa (julho-2001), observa-se predominância de albedo variando de 0,10 a 0,15 (75,16%), expressando aumento de 41,67% em relação ao ano anterior (2000), da área com albedo nessa amplitude. Esse comportamento é explicado devido ao regime pluviométrico da região na época de aquisição da imagem (julho de 2001), período esse coincidente com o final da estação das águas no semiárido cearense, em que o solo se apresenta ainda úmido, e a vegetação da região mantém a massa foliar.

Nesse ecossistema, a vegetação, dependendo da distribuição temporal das chuvas, apresenta elevada massa verde, contribuindo para a redução da radiação refletida pela cobertura vegetal. Mudanças significativas dessa variável em função da estação do ano, expressando a dinâmica desse processo nas regiões semiáridas, também foi verificada por WANG & DAVIDSON (2007). Esses autores argumentam a importância, por exemplo, em modelagem hidrológica, do cômputo de albedo superficial em diferentes épocas do ano e não de valores médios anuais, como ocorre em alguns modelos.

Da mesma forma que o albedo, o NDVI (Figura 4), quando avaliado de forma sazonal e em longo prazo, pode ser importante indicador de desertificação e de redução de fitomassa da Caatinga. As áreas de coloração cinza apresentaram menores índices de vegetação positivos, variando entre 0,003 e 0,20 (Figura 4A). Esse intervalo de classe é característico de áreas com vegetação rala ou sem vegetação, muito característica em regiões semiáridas. Essa magnitude de NDVI apenas é encontrada para os meses com ausência completa de chuvas, conforme averiguações de BARBOSA et al. (2006). Já para o ano de 2000 (Figura 4a), as magnitudes desse parâmetro variaram de 0,003 a 0,76, com predominância de valores na classe de 0,2 a 0,39. Segundo GURGEL et al. (2003), valores de NDVI menores que 0,3 são indicativo de áreas secas, de baixo regime pluviométrico.

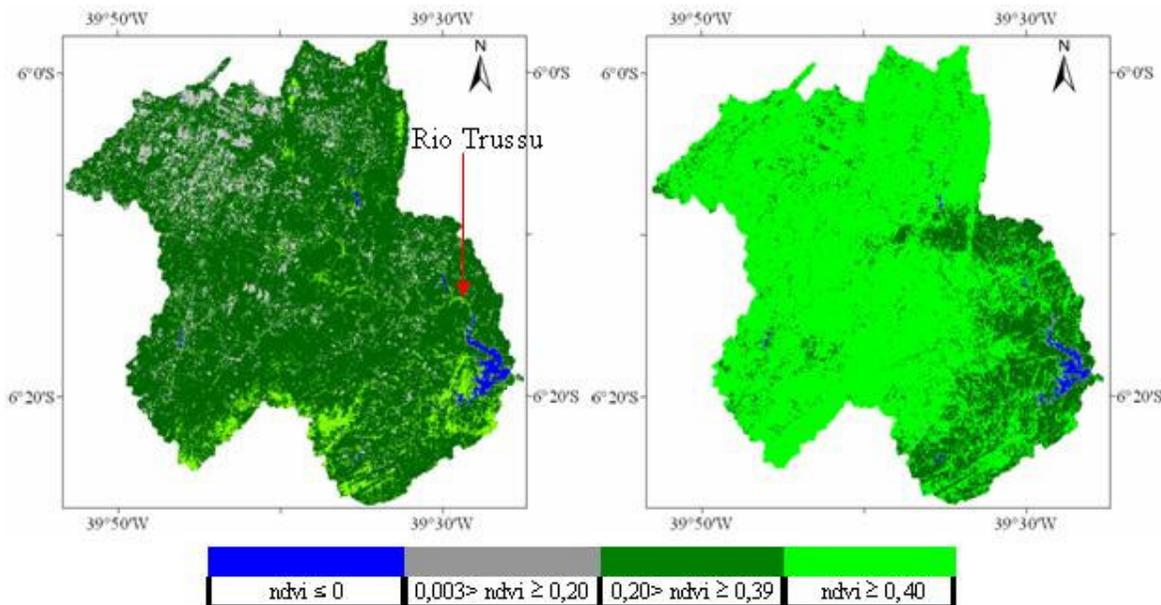


FIGURA 4. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para a bacia hidrográfica do Trussu - CE, em outubro de 2000 (A) e julho de 2001 (B). **Normalized difference vegetation index (NDVI) for the Trussu watershed - CE, in October 2000 (A) and July 2001 (B).**

Na área de estudo, aproximadamente 32% da imagem de 2000 apresentou valores de NDVI maiores que 0,3; os valores negativos são indicadores de presença de água, perfeitamente confirmado pela presença marcante do reservatório Trussu na parte sudoeste da imagem. Os 68% restantes, subtraídos dos *pixels* contendo água, nuvens e sombra de nuvens, estima-se que 66% da bacia do Trussu apresentaram baixa cobertura vegetal, cujos valores de NDVI se mostraram

inferiores a 0,3. Tal evidência relaciona-se ao período de imageamento da região (out./2000), correspondente ao período de menores precipitações pluviométricas (Figura 2), e também devido à própria vegetação da área, formada por caatinga caducifólia arbustiva, que se caracteriza pela queda das folhas no período de estiagem (agosto a dezembro).

A cor verde-clara na imagem expressa as áreas com vegetação mais intensa ou áreas cultivadas, situadas nas proximidades da barragem Trussu. Percebe-se, conforme indicação da Figura 4(A), altos valores de NDVI definindo o leito do Rio Trussu ($NDVI > 0,4$), indicando possível processo de preservação das matas ciliares. Averiguações semelhantes foram também descritas por BASTIAASSEN (2000), aplicando o algoritmo Sebal em estudo sobre evapotranspiração, na bacia do Rio Gediz, Turquia. Esse é um importante resultado do ponto de vista conservacionista, tendo em vista que o assoreamento de rios e reservatórios está associado à remoção da vegetação nativa.

Ao se constatarem alguns pontos isolados que apresentaram NDVI próximos a 0,8 (0,2%), acredita-se que os mesmos representem algumas espécies nativas adaptadas (*Zizyphus joazeiro* e *Prosopis juliflora*) que apresentam, sempre, alta densidade foliar.

As alterações nos valores dessa variável biofísica entre os dois períodos avaliados (Figura 4B) são facilmente verificáveis pelos maiores valores de NDVI presentes em grande parte da imagem (coloração verde-clara). Aproximadamente 76,5% da bacia estudada mostraram-se com magnitude nos valores de NDVI superiores a 0,4. Apesar de o ano de 2001 ter evidenciado menores alturas pluviométricas, comparado a 2000, a precipitação pluviométrica ocorrida no mês de junho (Figura 2) foi determinante para as mudanças ocorridas nos valores de NDVI para o ano de 2001.

Esse período coincide com o final da estação chuvosa, quando ainda existe grande extrato herbáceo e presença marcante de dossel foliar da vegetação, contribuindo de maneira expressiva na elevação do NDVI. Tal comportamento fica evidente pela análise da Figura 2, na qual se constatou ocorrência de precipitação pluviométrica (105 mm) no mês de junho, próximo à época de imageamento da bacia. Vale ressaltar que, para o ano de 2001, junho representou mês atípico no que se refere à pluviosidade, cuja magnitude atingiu desvio percentual de 62,5% maior que a média histórica desse mês. Portanto, acredita-se que a elevada diferença dos valores de NDVI para os dois anos investigados seja decorrente do aporte de umidade promovido pelas chuvas ocorridas no mês de junho/2001.

GURGEL et al. (2003), estudando variabilidade do NDVI em todo o Brasil, confirmaram alta correlação entre a variável precipitação pluviométrica e NDVI. Apesar de a Caatinga ser considerada como um bioma de elevada fragilidade, seu alto poder de resiliência confirma-se pela formação da biomassa imediata em resposta aos eventos de chuva. Esse comportamento da vegetação do semiárido em resposta a eventos de chuvas foi também constatado por BARBOSA et al. (2006), que mostraram a capacidade de recuperação da vegetação em períodos de estiagem.

Semelhantemente às variáveis discutidas, o saldo de radiação (R_n) apresentou alta variação entre os dois períodos avaliados (Figura 5A). O maior saldo de radiação foi registrado para o dia 25-10-2000, variando de 280 a 810 W m^{-2} , enquanto para a imagem de 2001 (Figura 5B), a variação foi de 280 a 614 W m^{-2} . Os maiores valores do saldo de radiação para imagem de 2000 ocorreram, principalmente, devido à menor quantidade de vapor d'água e ao período de aquisição da imagem (outubro-2000), o que permite maior incidência radiativa, expressa pela maior radiação de ondas curtas incidentes (Tabela 1).

Os maiores saldos de radiação em ambos os períodos (Figuras 5A e 5B) foram registrados sobre os mesmos *pixels*, que correspondem às áreas de maiores altitudes da bacia, com a presença de vegetação mais intensa. Para a imagem de 25-10-2000 (Figura 5A), os maiores saldos de radiação variaram entre 688 e 735 W m^{-2} . Essa mesma zona, para a imagem de 24-7-2001, apresentou saldo de radiação entre 540 e 575 W m^{-2} , com coloração verde-clara (Figura 5B).

Constatou-se influência marcante do período de imageamento sobre o saldo de radiação, sendo esse diretamente correlacionado à estação do ano que influencia diretamente na radiação solar global e nas condições de vegetação, facilmente verificado para imagem de 2000, na qual se constata maior magnitude do Rn. Esses resultados estão em consonância aos obtidos por DI PACE et al. (2008) e SILVA et al. (2005a), que obtiveram maior saldo de radiação para áreas vegetadas, em detrimento de solo exposto, e também para condições de maior radiação solar global.

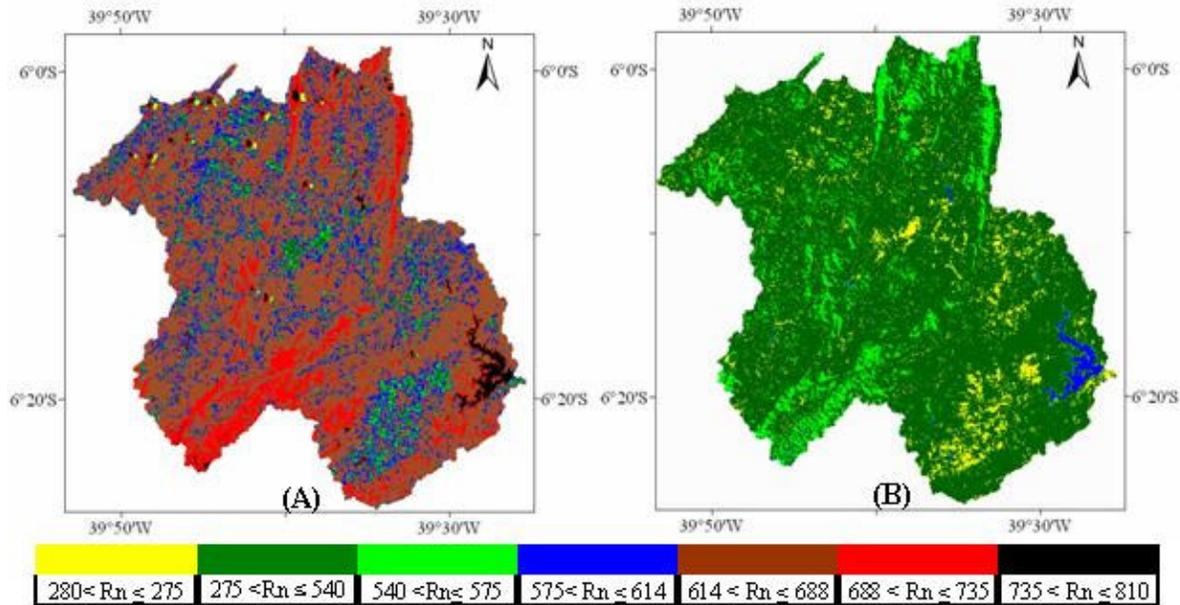


FIGURA 5. Saldo de radiação (Rn) para a bacia hidrográfica do Trussu - CE, em outubro de 2000 (A) e julho de 2001 (B). **Net radiation for the Trussu watershed - CE, in October 2000 (A) and July 2001 (B).**

Os maiores valores de Rn foram registrados no reservatório Trussu, por razão de ser nesse onde se verifica a ocorrência de menor albedo e de elevada capacidade de armazenar energia, devido ao alto calor específico da água. Para a carta de 2000 (Figura 5A), o saldo de radiação sobre esse alvo atingiu valores entre 735 e 810 $W m^{-2}$, consistente com resultados obtidos por SILVA et al. (2005a), para corpos hídricos em condições climáticas semelhantes à deste estudo. As áreas ausentes de corpos hídricos, para o ano de 2000, alcançaram valores máximos de Rn 688 $W m^{-2}$, enquanto na imagem de 2001, esse valor foi de 575 $W m^{-2}$, o que está associado à ocorrência de chuvas, mais precisamente ao evento de 105 mm registrado em junho-2000, próximo à passagem do satélite sobre a bacia de estudo, com conseqüente absorção de energia por parte da umidade presente no solo e no ar (Figura 2). Os valores de temperatura da superfície, em 24-7-2001, foram inferiores aos do dia 25-10-2001, constatado pela diferença modal de 3,58 °C (Tabela 1).

Das componentes envolvidas no saldo de radiação (Rn), a radiação de ondas curtas incidentes mostrou-se com maior variação entre os períodos avaliados, conforme constatação da Tabela 1. O desvio percentual modal entre os anos para essa componente foi de 18,5%; já para as demais componentes, radiação de ondas longas emitidas, incidentes e albedo, as diferenças percentuais mostraram magnitudes de 4,3; 3,4 e 7,1%, respectivamente. Observaram-se alterações em todas as variáveis do balanço de energia, sendo os maiores valores registrados para o ano de 2000, com exceção da emissividade e da NDVI, em que se constataram maiores valores para 2001. Aponta-se a precipitação pluviométrica como sendo a principal causa dessas modificações. Tais averiguações são compatíveis com as feitas por SILVA & BEZERRA (2006), estudando regiões de clima semiáridas.

TABELA 1. Dados estatísticos para algumas variáveis do balanço de energia para as datas de 25-10-2000 e 24-7-2001, para a bacia do Rio Trussu - CE. **Statistic data for some of the radiation balance variables in October 25, 2000 and July 24, 2001 in the Trussu watershed - CE.**

Variáveis do Balanço de Energia	Dados Estatísticos do Balanço de Energia								
		2000				2001			
	Unidades	Máximo	Mínimo	Média	Moda	Máximo	Mínimo	Média	Moda
Saldo de radiação	(W m ⁻²)	814,70	280,39	646,42	661,29	617,40	270,50	520,14	530,68
Radiação de ondas curtas incidentes	(W m ⁻²)	948,51	934,40	938,18	936,94	776,37	764,82	767,91	766,90
Radiação de ondas longas emitidas	(W m ⁻²)	617,50	372,92	476,04	481,89	509,17	417,32	468,36	461,25
Radiação de ondas longas incidentes	(W m ⁻²)	358,40	356,64	357,93	358,12	346,22	344,52	345,77	345,95
Fluxo de calor no solo	(W m ⁻²)	239,07	35,19	105,79	108,81	180,88	35,16	73,18	77,46
Emissividade (ε _o)	(-)	0,985	0,948	0,951	0,950	0,985	0,948	0,954	0,954
Temperatura superfície	(°C)	39,00	19,82	32,89	33,89	37,62	23,00	31,44	30,31
Albedo	(-)	0,64*	0,03	0,16	0,14	0,49	0,03	0,14	0,13
NDVI	(-)	0,77	-0,37	0,28	0,26	0,85	-0,38	0,49	0,39

* *Pixels* representativos de nuvens

Os maiores valores da temperatura na superfície, em 2000 (Tabela 1), podem ser explicados pela maior ou menor quantidade de energia em forma de calor sensível, em decorrência da baixa proporção da vegetação sobre a área nessa data. Assim, maior fração de energia líquida é empregada para aquecer o ar e o solo, e menor proporção é destinada aos processos evapotranspirativos, em forma de calor latente. Por outro lado, para o ano de 2001, os valores de temperatura do solo foram atenuados, provavelmente pela presença de umidade no ar e no solo, atuando como agente redutor da temperatura da superfície. IZIOMON & MAYER (2002) comentam o importante efeito do vapor d'água sobre a redução desse componente do balanço de energia.

O fluxo de calor no solo representa a fração da radiação que foi transferida ao solo da bacia, resultando em acréscimo de energia nesse, a qual é expressa pela temperatura da superfície. Para a imagem de 2000 (Figura 6A), o fluxo de calor no solo variou de 35,19 a 239,07 W m⁻², com predominância da classe de 100 a 135 W m⁻². Os corpos hídricos (azul) mostraram fluxos de calor maiores que 135 W m⁻², fato esse decorrente do elevado calor específico da água. SILVA & BEZERRA (2006), empregando imagens Landsat 5, no mês de dezembro do mesmo ano deste estudo, nas regiões de Juazeiro - BA, e Petrolina - PE, com climas semelhantes aos deste estudo, obtiveram valores superiores a 190 W m⁻² para corpos d'água. Vale ressaltar que a relação usada neste estudo (G=0,3Rn), para corpos hídricos (NDVI<0), foi a mesma empregada por SILVA & BEZERRA (2006), enquanto ALLEN et al. (2002) consideraram G=0,5Rn, em condições de lagos profundos. Portanto, para melhorar essa parametrização, estudos específicos devem ser realizados, conforme sugestão de SILVA & BEZERRA (2006).

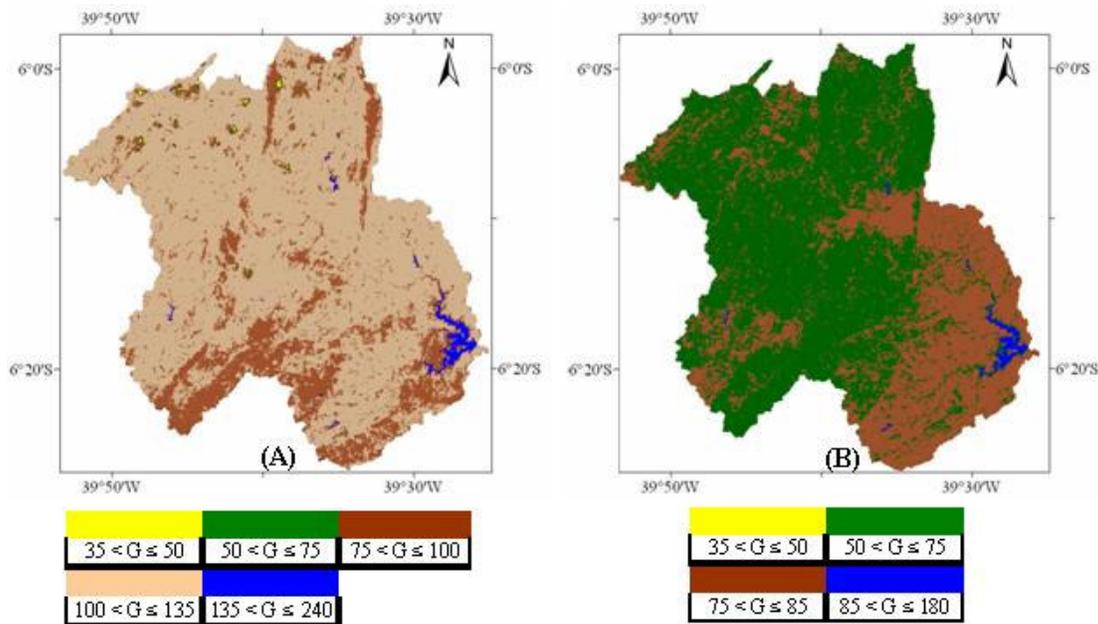


FIGURA 6. Fluxo de calor no solo (G) para a bacia hidrográfica do Trussu - CE, em outubro de 2000 (A) e julho de 2001 (B). **Soil heat flux (G) for the Trussu watershed - CE, in October 2000 (A) and July 2001 (B).**

Observa-se, na imagem de 25-10-2000 (Figura 6A), grande extensão da bacia do Trussu com fluxo de calor no solo variando de 100 a 135 W m^{-2} , representando, aproximadamente, 77,5% da área, e possivelmente associada à ausência de chuvas nesse período. As regiões de maior altitude (21% da área total) apresentaram fluxo de calor no solo de 75 a 100 W m^{-2} . Essas áreas apresentam vegetação mais densa, sendo, portanto, capaz de manter a umidade do solo por um período maior, diferentemente dos 77,5% da bacia com fluxo de calor do solo entre 100 e 135 W m^{-2} . Nessas áreas, há predominância de solo exposto e de vegetação caducifólia comumente encontrada no semiárido brasileiro, com tendência em elevar o fluxo de calor no solo. Esses valores são compatíveis aos encontrados por SILVA & BEZERRA (2006), que, para regiões semiáridas, obtiveram valores médios na ordem de 103,7 e 106,8 W m^{-2} , em condições de solo descoberto e Caatinga, respectivamente.

Constatou-se claramente que o fluxo de calor no solo apresentou padrões diferenciados em ambos os anos, conforme mostra a Figura 6. Enquanto, na carta de 2000, a área com fluxo de calor no solo, enquadrada na classe de 50 e 75 W m^{-2} , encontra-se quase imperceptível e para a carta de 2001, esse intervalo representa percentual de 61,6% da área da bacia. Portanto, as alterações entre os anos estão associadas aos efeitos da precipitação, promovendo, dessa forma, alterações na temperatura do solo, albedo, índices de vegetação e demais componentes do balanço de energia.

CONCLUSÕES

Ocorreu diferença dos parâmetros biofísicos albedo, NDVI, saldo de radiação e fluxo de calor no solo, em resposta a variações climáticas para o período avaliado. A vegetação da bacia hidrográfica do Trussu mostrou-se com alto poder resiliente, sendo confirmado pelo grande aporte de vegetação para o ano de 2001, expresso pelos maiores valores de NDVI para esse ano. Pelos altos valores de NDVI próximos às margens do Rio Trussu no período seco, ficou constatado o processo de conservação de mata ciliar nessa bacia. Para esse mesmo parâmetro, confirmou-se que foi na estação chuvosa e para as maiores elevações que o NDVI teve os maiores valores; nessa mesma situação, o albedo apresentou-se com menores valores. Quanto ao saldo de radiação e ao fluxo de calor no solo, esses foram expressivamente influenciados pelo regime pluviométrico.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio por meio da concessão de bolsas aos pesquisadores deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; TREZZA, R.; TASUMI M. *Surface energy balance algorithms for land - Advance training and users manual*. Version 1.0. Idaho: Kimberly, 2002. p.98.
- BARBOSA, H.A.; HUETI, A.R.; BAETHGEN, W.E. A 20 - year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. *Journal of Arid Environments*, London, v.67, p.288-307, 2006.
- BASTIAANSEN, W.G.M. *Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain*. 1995. 273 f. Tese (Ph.D.) - Wageningen Agricultural University, Wageningen, 1995.
- BASTIAANSEN, W.G.M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.229, n.1, p.87-100, 2000.
- BASTIAANSEN, W.G.M.; MENENTI, M.; FEDDES, R.A.; HOLTSLAG, A.A.M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2. Validation. *Journal of Hydrology*, London, n.212-213, p.213-229, 1998.
- COTEC. Consultoria Técnica. *Barragem Trussu: Estudo e avaliação dos impactos ambientais*. Tomo I: diagnóstico ambiental. Fortaleza: PRONI-DNOCS, 1989. 118 p. Diagnóstico Ambiental.
- DI PACE, F.T.D.; SILVA, B.B.; SILVA, V.P.R.; SILVA, S.T.A. Mapeamento do saldo de radiação com imagens Landsat 5 e modelo de elevação digital. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.12, n.4, p.385-392, 2008.
- GURGEL, H.C.; FERREIRA, N.J.; LUIZ, A.J.B. Estudo da variabilidade do NDVI sobre o Brasil utilizando-se a análise de agrupamento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.7, n.1, p.85-90, 2003.
- IZIOMON, M.G.; MAYER, H. On the variability and modeling of surface albedo and long-wave radiation components *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.111, p.141-152, 2002.
- MARKHAM, B.L.; BARKER, J.L. Thematic Mapper band pass solar exoatmospherical irradiances. *International Journal of Remote Sensing*, London, v.8, n.3, p.517-523, 1987.
- MOREIRA, M.A. *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. 2.ed. Viçosa - MG: UFV, 2003. 307 p.
- OGUNTUNDE, P.G.; AJAYI, A.E.; GIESEN, N.V. Tillage and surface moisture effects on bare-soil albedo of a tropical loamysand. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.85, n.1-2, p.107-114, 2006.
- PALÁCIO, H.A.Q. *Índice de qualidade das águas na parte baixa da bacia hidrográfica do Rio Trussu*. 2004. 96 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.
- SILVA, B.B.; BEZERRA, M.V.C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - Landsat 5. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.14, n.2, p.174-186, 2006.
- SILVA, B.B.; LOPES, G.M.; AZEVEDO, P.V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5-TM. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São José dos Campos, v.20, n.2, p.243-252, 2005a.

SILVA, B.B.; LOPES, G.M.; AZEVEDO, P.V. Determinação do albedo em áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5-TM. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São José dos Campos, v.13, n.2, p.201-211, 2005b.

SOUZA, J.D.; SILVA, B.B. Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM - Landsat 5. *Revista Brasileira de Geofísica*, Rio de Janeiro, v.23, n.4, p.349-358, 2005.

VERSIANI, B.V.B.N.; RODRIGUES, P.C.H. Geoprocessamento como ferramenta no estudo de correlação entre a dinâmica da cobertura vegetal e a evapotranspiração. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São José dos Campos, v.13, n.2, p.201-211, 2007.

WANG, S.; DAVIDSON, A. Impact of climate variations on surface albedo of a temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.142, p.133-142, 2007.