

Artigo

Obtenção de Parâmetros Ambientais na Região Semiárida da Paraíba por Dados MODIS

Carlos Antonio Costa dos Santos¹, Marcia Vanessa Gomes Costa¹, Madson Tavares Silva¹, Lindenberg Lucena da Silva¹, Francineide Amorim Costa Santos², Bergson Guedes Bezerra³, Salomão de Sousa Medeiros⁴

¹*Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.*

²*Instituto de Formação de Educadores, Universidade Federal do Cariri, Brejo Santo, CE, Brasil.*

³*Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.*

⁴*Instituto Nacional do Semiárido, Campina Grande, PB, Brasil.*

Recebido em 12 de Setembro de 2016 – Aceito em 23 de Janeiro de 2017

Resumo

O comportamento espacial e temporal do saldo de radiação (Rn) à superfície terrestre tem sido tema de estudos sobre os ecossistemas de regiões semiáridas do globo e poucos estudos têm sido destinados à região semiárida do Brasil, especificamente no ecossistema de Caatinga. Logo, o objetivo deste estudo foi utilizar uma metodologia que não necessite diretamente de dados de superfície para estimar o Rn na região semiárida da Paraíba, a partir de dados orbitais do sensor MODIS, e validar com dados medidos em áreas experimentais de Caatinga em recuperação e degradada. Diante dos resultados encontrados, pode-se constatar a eficácia da metodologia proposta, sendo a mesma mais precisa em áreas com o solo mais descoberto. De acordo com a análise estatística, a metodologia apresentou uma melhor qualidade do ajuste para a área em recuperação, com a variação explicada de 78% e para a área degradada de 61%.

Palavras-chave: saldo de radiação, albedo, imagens MODIS, semiárido, caatinga.

Obtaining of Environmental Parameters in the Semiarid Region of Paraíba by MODIS Data

Abstract

The spatial and temporal behavior of the surface net radiation (Rn) has been studied on ecosystems of semi-arid regions of the world and few studies have been intended for semi-arid region of Brazil, specifically in the Caatinga ecosystem. Therefore, the aim of this study was to use a methodology that does not require surface data to estimate the Rn in the semiarid region of Paraíba, from orbital MODIS data, and validate with data measured in experimental areas of Caatinga in recovery and degraded. Considering the results, it can be seen the effectiveness of the proposed methodology, and the same more precise in areas with the barest ground. According to the statistical analysis methodology showed a better quality of fit for the recovery area, with explained variance of 78% and a degraded area of 61%.

Keywords: net radiation, albedo, MODIS images, semiarid, caatinga.

1. Introdução

Regiões de clima semiárido estão constantemente sob o efeito de intensa radiação solar. Os efeitos e causas do aumento da temperatura é um dos assuntos mais discutidos

por estudiosos em âmbito global. A energia total incidente nas formas de onda curta e onda longa afetam diretamente o balanço de radiação à superfície (Rn), e isso ocorre de forma diferenciada, a depender de sua intensidade, e das condições atmosféricas para absorção, reflexão, transmi-

tância, reemitância, espalhamento; além de fatores topográficos e diversos outros fatores ambientais e antrópicos.

O fluxo de radiação líquido pode ser definido segundo Blad *et al.* (1998) como a diferença entre o fluxo de radiação de entrada e saída total. O saldo de energia disponível na superfície da terra é a forçante que impulsiona a fotossíntese, evaporação de água e aquecimento do solo e do ar resulta ainda como termo chave de equilíbrio energético sobre a superfície tornando-se extremamente importante para estudos de gestão em agricultura, hidrologia e estudos climáticos (Niemela *et al.*, 2001).

Medidas contínuas e confiáveis de R_n são fundamentais para pesquisas e aplicações em meteorologia, visto que determina o total de energia disponível para os processos físicos e biológicos, tais como, evapotranspiração e aquecimentos do ar e do solo. De acordo com Ayoola *et al.* (2014), dados de R_n são requeridos na modelagem dos processos de trocas de calor e massa entre a biosfera e a atmosfera (Arya, 1988; Iziomon *et al.*, 2000; Foken, 2008). O R_n é a diferença entre radiações incidentes e emitidas pela superfície terrestre no espectro dos comprimentos de ondas curtas (0.3-3.0 μm) e longas (3.0-100.0 μm).

Segundo Wang *et al.* (2015) a dinâmica de R_n afeta o balanço de energia à superfície terrestre, regulando assim, diversos processos meteorológicos, hidrológicos e biológicos. O R_n é uma função das condições atmosféricas (presença de nuvens e aerossóis, perfis de temperatura e vapor de água) e das características da superfície (albedo, emissividade e temperatura da superfície). Assim, há uma necessidade por medidas precisas dessa variável para um melhor entendimento de sua dinâmica temporal, isto é, sazonalidade e variabilidade interanual, assim como, da sua distribuição espacial.

Métodos tradicionais para a obtenção de R_n medem todas as componentes de ondas curtas e longas e, em seguida, é calculada a diferença entre os fluxos radiativos incidentes e emitidos pela superfície (Liang *et al.*, 2010). Assim, R_n é normalmente positivo durante quase todo o período diurno e negativo durante a noite. Adicionalmente, dados de R_n são raramente disponíveis devido às limitações técnicas e econômicas associadas com as medidas diretas. Além disso, quando as medidas de R_n são disponíveis, geralmente estão limitadas a pequenas áreas e não representam a variabilidade espacial (Carmona *et al.*, 2015). Dessa forma, pesquisadores têm desenvolvido seus estudos na perspectiva de estimar R_n em escala regional (Bisht *et al.*, 2005; Bisht e Bras, 2010; Carmona *et al.*, 2015). Para isso, é necessário combinar observações de sensoriamento remoto com dados atmosféricos e de superfície, em que a variabilidade espacial pode ser melhor descrita. Dentre várias alternativas de se estimar o fluxo de radiação líquido as aplicações do sensor multiespectral MODIS destacam-se como uma ferramenta eficaz para a observação da superfície terrestre e estado da atmosfera com alta resolução espaço-temporal. Segundo Masuoka *et al.* (1998), desta-

cam-se os estudos que permitem as estimativas da radiação líquida independente dos dados auxiliares obtidos a partir de observações de superfície. Bisht *et al.* (2005) desenvolveram um esquema de parametrização para a estimação de fluxo de radiação líquido nas Grandes Planícies do Sul, EUA, usando dados MODIS. Ainda se destaca o trabalho de Hwang *et al.* (2013) com estimativas independentes do fluxo de radiação no Leste Asiático a partir da modelagem de produtos MODIS. Contudo, algumas limitações são associadas ao processo de modelagem a partir de dados orbitais, tais como as que se referem a terrenos montanhosos, como variações de altitude, declive, orientação (aspecto) e sombras emitidas por características topográficas, e assim resultam em fortes gradientes de radiação solar local (Tovar-Pescador *et al.*, 2006).

A precisão das informações de R_n obtidas a partir do processamento digital de produtos de sensoriamento remoto orbital tem sido avaliada por diferentes estudos (Mira *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2013). Essas análises comparam estimativas por sensoriamento remoto com medidas obtidas em campos experimentais sobre ecossistemas específicos. No entanto, poucos estudos têm sido destinados ao entendimento do comportamento espacial e temporal de R_n na região semiárida do Brasil, especificamente no ecossistema de Caatinga. Logo, o objetivo deste estudo foi utilizar uma metodologia que não necessite de dados de superfície para estimar o R_n em parte da região semiárida do Estado da Paraíba, a partir de dados orbitais do sensor MODIS, e validar os resultados obtidos com dados medidos em campos experimentais de Caatinga em recuperação e também em área degradada no município de Campina Grande-PB.

2. Material e Métodos

2.1. Área de estudo

O município de Campina Grande está localizado no Estado da Paraíba, no Nordeste do Brasil (7°13'11" S e 35°52'31" W) (Fig. 1). A sede do município de Campina Grande está situada na Mesorregião Geográfica do Agreste Paraibano, na Zona Centro Oriental da Paraíba, no planalto da Borborema. Segundo dados estimados (IBGE, 2016), Campina Grande é o segundo município em população do Estado (407.754 habitantes), e exerce grande influência política e econômica sobre outros 57 municípios em seu entorno. Este conjunto de municípios é denominado de Compartimento da Borborema e é constituído de 5 microrregiões conhecidas como Agreste da Borborema, Brejo Paraibano, Cariris Velhos, Seridó Paraibano e Curimatá. As áreas do município e zona urbana apresentam, 621 km² e 98 km², respectivamente. Inserida no setor leste da Serra Borborema (550 m acima do nível do mar) a região tem uma topografia ondulante e um clima semiárido equatorial com temperaturas médias entre 22 °C e 25 °C. A vegetação

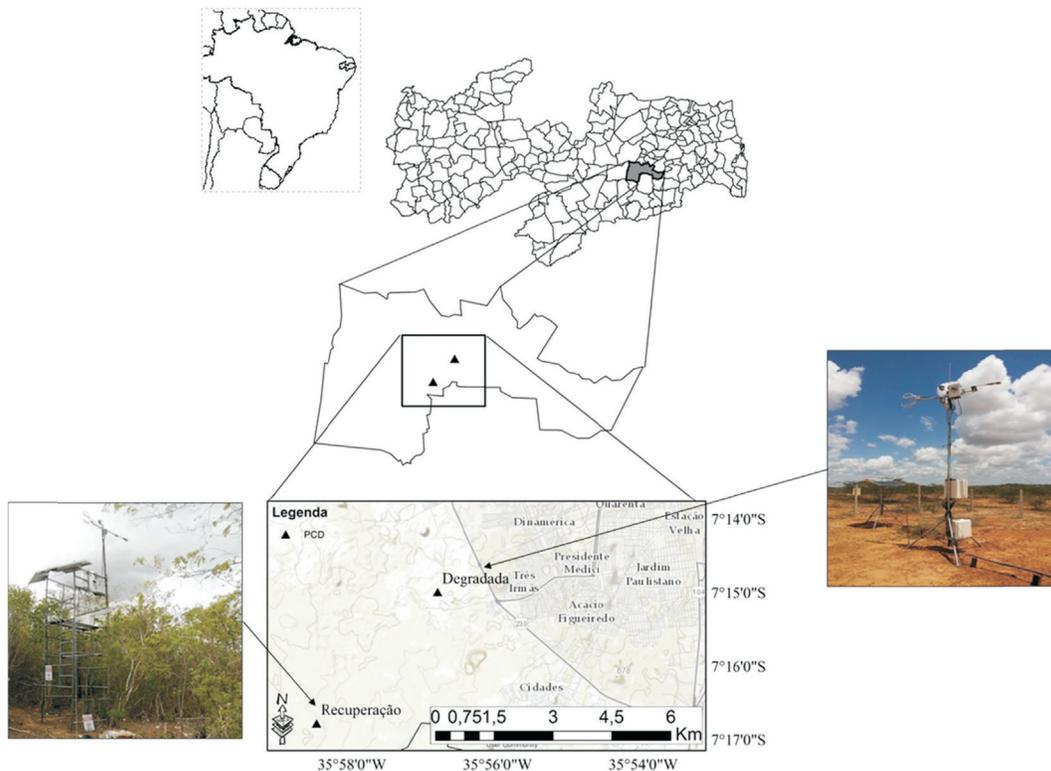


Figura 1 - Localização da área de pesquisa e das torres micrometeorológicas nas áreas de caatinga em recuperação e degradada.

próxima a Campina Grande inclui “agreste”, “brejo” e áreas de “cariri” ou “caatinga” (Rocha *et al.*, 2006).

A área de estudo está inserida em parte da região semiárida do Estado da Paraíba ($06^{\circ}01'55''$ S, $34^{\circ}47'05''$ O e $08^{\circ}18'37''$ S/ $38^{\circ}45'38''$ O) (Figs. 1a e 1b), tal região abrange um total de 170 dos 223 municípios paraibanos. A área territorial do estado da Paraíba corresponde a $56.469,778 \text{ km}^2$ (IBGE, 2015), e sua população é de aproximadamente 3.914.421 habitantes (estimativa do IBGE para 2013), e segmenta-se em quatro mesorregiões: Mesorregião do Sertão Paraibano, Mesorregião da Borborema, Mesorregião do Agreste Paraibano e Mesorregião da Mata Paraibana, a qual corresponde ao litoral. Situado na parte da porção mais oriental do Nordeste Brasileiro (NEB), o Estado limita-se ao norte, com o Estado do Rio Grande do Norte; ao sul, com o Estado do Pernambuco; a leste, com o Oceano Atlântico e a oeste, com o Estado do Ceará. Sua economia baseia-se no setor de comércio e serviços, na indústria (alimentícia, têxtil, de couro, de calçados, metalúrgica, sucroalcooleira) na agricultura (principalmente de cana-de-açúcar, abacaxi, mandioca, milho e feijão), na pecuária (principalmente na ovinocaprinocultura) e no turismo.

Na Paraíba prevalece o clima semiárido, que é caracterizado pela baixa umidade relativa e pouco volume pluviométrico, com precipitação média anual inferior a 800 mm; na parte litorânea do Estado, os totais anuais podem superar os 1.500 mm; essa variação espacial da pluviosidade no Esta-

do é provocada por diferentes sistemas atmosféricos que atuam no Nordeste do Brasil (Silva *et al.*, 2003). Desse modo, o clima no Estado se divide conforme a extensão territorial da Paraíba, pois sofre influência da umidade do Oceano Atlântico, a leste, e ao mesmo tempo, é configurado pelo Polígono das Secas, que o influencia com altas temperaturas e baixa pluviosidade. De acordo com a classificação climática de Köppen, do litoral até a região da mata o clima é configurado como do tipo Tropical Quente e Úmido (As), com chuvas de outono a inverno e as temperaturas são em média de 26°C , e as médias pluviométricas anuais desta região chegam em torno de 1.800 mm. Em grande parte das mesorregiões da Borborema e do Sertão predomina o clima semiárido quente (BSh), caracterizado pela irregularidade de chuvas, em torno de 500 mm anuais, e temperaturas em torno de 26°C . Na mesorregião do Sertão Paraibano, a temperatura fica em torno de 27°C . Denota-se na Paraíba o clima Quente Semiúmido (Aw) com chuvas de verão, em torno de 800 mm anuais, com influência da massa de ar quente e úmida advinda da região amazônica.

2.2. Dados

Para o presente trabalho, foram utilizados dados e produtos derivados do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) (obtidos em dias de céu claro), a bordo do satélite Terra (EOS-AM), referentes ao período de janeiro a dezembro de 2013, caracterizando

assim, uma avaliação anual com relação aos fluxos radiativos.

O número reduzido de DOA (dias de ordem do ano) referente à área degradada, comparados aos da área em recuperação, deu-se devido à falta de dados medidos (para validação) de albedo e de R_n para alguns dias da pesquisa, a saber: 25, 33, 57, 65 e 329.

O critério utilizado para obtenção das imagens foi a garantia da mínima presença de nuvens. Os dados dos diferentes produtos MODIS usados na pesquisa são armazenados em formato *Hierarchy Data Format* (HDF), e são adquiridos gratuitamente por meio de plataformas virtuais da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Os dados MODIS selecionados para a pesquisa correspondem ao *tile* v09_h14, e são referentes ao ano de 2013.

Para a conversão dos dados em formato *GeoTIFF* e *img* foram utilizados os softwares MRT (*MODIS Reprojection Tool*) e HEGTool, respectivamente. Os produtos utilizados foram provenientes de dados coletados pelo sensor MODIS acoplado ao satélite *Terra*, que dispõe de produtos voltados para estudos das áreas continentais, oceânicas e atmosféricas, além de produtos de calibração, os quais estão descritos na Tabela 1.

Para a validação do algoritmo proposto para a obtenção da estimativa de R_n utilizando dados orbitais, também foram adquiridos dados de superfície (radiação de onda curta incidente e refletida, radiação de onda longa emitida, radiação de onda longa incidente, albedo, temperatura e umidade do ar, pressão de vapor e pressão de saturação de vapor), os quais foram medidos utilizando saldo radiômetro (CNR 4, Kipp & Zonen), que é composto por dois piranômetros (CM3) e dois pirgeômetros (CG3); e o sensor de temperatura e umidade relativa do ar (HC2S3-L, Campbell Scientific); e os demais dados foram medidos através de uma estação meteorológica automática (AWS ET107, Campbell Scientific). Os sensores foram instalados a 8 m acima da superfície, e os do solo nas profundidades de 2 cm e 5 cm. Os dados foram coletados em dois ambientes

naturais com vegetação de caatinga: área em recuperação e área degradada.

As torres micrometeorológicas contendo a instrumentação ambiental foram instaladas em locais de coordenadas 7°16'47.76" S e 35°58'29.21" O (área em recuperação) e 7°14'59.78" S e 35°56'49.70" O (área degradada), no município de Campina Grande - PB.

Os dados diários de precipitação pluvial (mm) são referentes ao período de janeiro a dezembro de 2013 da estação meteorológica do INMET - Instituto Nacional de Meteorologia instalada na sede da Embrapa Algodão em Campina Grande-PB e são oriundos do BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa.

3. Metodologia

Primeiramente foi realizada a etapa do pré-processamento das imagens, onde todas elas foram reprojetaadas para o Sistema de Coordenadas Geográficas e Datum WGS-84, e reamostradas para 1000 m para uniformização da resolução espacial utilizando os programas HEGTool e MRT (*MODIS Reprojection Tool*), que tem o objetivo de alterar a projeção e o formato do produto, além de realizar o mosaico de imagens. Os produtos MODIS que necessitam da aplicação de fatores de correção e adicionais, sofreram as correções devidas.

Para o processamento e análise dos dados, foi utilizado o software ERDAS Imagine na versão 8.5, o qual possui avançadas ferramentas para modelagem espacial e tratamento de novas informações, além de recursos de SIG (Sistema de Informações Geográficas).

A metodologia empregada para estimativa do balanço de radiação à superfície seguiu a forma das equações anteriormente de aplicadas por Bisht e Bras (2011), em que primeiramente foi calculada a radiação de onda curta incidente e, em seguida, foram calculadas as demais variáveis necessárias para a estimativa do R_n instantâneo para condições de céu claro assim como descrito na Eq. (1).

$$R_n = R_{S\downarrow} - \alpha R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0) R_{L\downarrow} \quad (1)$$

Tabela 1 - Produtos MODIS utilizados na pesquisa.

Produto	Tipo de produto	Parâmetros utilizados	Fator multiplicativo	Fator adicional	Unidade	Resolução espacial (pixel) e temporal
MOD07-L2	Atmosfera	Temperatura do ar e do ponto de orvalho	0,01	+ 15.000	Kelvin	5.000 m (diário)
MOD09-A1	Superfície Terrestre	Reflectância de superfície	0,0001	—	Adimensional	500 m (8 dias)
MCD43-A3	Superfície Terrestre	Albedo	0,001	—	Adimensional	500 m (16 dias)
MOD11-A2	Superfície Terrestre	Temperatura da superfície	0,02	—	Kelvin	1.000 m (8 dias)
MOD11-A2	Superfície Terrestre	Emissividade	0,002	+ 0,49	Adimensional	1.000 m (8 dias)
MOD13-Q1	Superfície Terrestre	NDVI	0,0001	—	Adimensional	250 m (16 dias)

em que $R_{S\downarrow}$ é a radiação de onda curta incidente; α é o albedo da superfície; $R_{L\downarrow}$ é a radiação de onda longa incidente; $R_{L\uparrow}$ é a radiação de onda longa emitida; $(1 - \varepsilon_0)R_{L\downarrow}$ corresponde a radiação de onda longa refletida pela superfície e ε_0 é a emissividade da superfície. O termo $\alpha R_{S\downarrow}$ representa o fluxo de radiação de onda curta refletida pela superfície.

A sequência de equações inicia-se com o cálculo da radiação de onda curta incidente ($R_{S\downarrow}$), em $W.m^{-2}$ a partir da Eq. (2):

$$R_{S\downarrow} = \frac{S_0 \cos^2 \theta}{1,085 \cos \theta + 0,01e_0 (2,7 + \cos \theta)\beta} \quad (2)$$

em que S_0 é a constante solar ($1367 W.m^{-2}$); θ é o ângulo zenital solar (em radianos); e_0 é a pressão de vapor à superfície (hPa); e $\beta = 0,2$, é um coeficiente que pode ser utilizado para ajustar os resultados.

O ângulo zenital solar (θ), em graus, foi obtido a partir do produto MOD09-A1. A pressão de vapor à superfície (e_0), em hPa, foi calculada de acordo com a Eq. (3) assim como proposta por Clausius-Clapeyron:

$$e_0 = 6,11 \exp \left[\frac{L_v}{R_v} \left(\frac{1}{273,15} - \frac{1}{T_d} \right) \right] \quad (3)$$

em que $L_v = 2,5 \times 10^6 J.kg^{-1}$ (calor latente de vaporização) e R_v é a constante do gás para o vapor de água ($461 J.kg^{-1}.K^{-1}$). A temperatura do ponto de orvalho (T_d), em Kelvin, foi obtida através do produto MOD07-L2, tendo em vista o fator de correção de escala e o fator adicional.

A radiação de onda longa incidente ($R_{L\downarrow}$) é uma variável de grande importância no cálculo do balanço de radiação à superfície, pois esta representa a contribuição da atmosfera e engloba informações de nebulosidade e concentração de vapor d'água. Para o cálculo de $R_{L\downarrow}$ ($W.m^{-2}$), utilizou-se a Eq. (4):

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

em que σ é a constante de Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$); ε_a é a emissividade do ar (ver Eqs. (5) e (6)) e T_a é a temperatura do ar próximo à superfície (em Kelvin), obtida através do produto MOD07-L2. Para estimativa da emissividade do ar foi utilizada a parametrização empregada anteriormente por Prata (1996), assim como descrita nas Eqs. (5) e (6), respectivamente:

$$\varepsilon_a = 1 - (1 + \xi) \exp(-\sqrt{(1,2 + 3\xi)}) \quad (5)$$

$$\xi = \frac{46,5}{T_a} e_0 \quad (6)$$

A radiação de onda longa emitida pela superfície terrestre ($R_{L\uparrow}$), em ($W.m^{-2}$), em direção à atmosfera, pode ser expressa de acordo com a Eq. (7):

$$R_{L\uparrow} = \sigma \varepsilon_s T_s^4 \quad (7)$$

em que ε_s é a emissividade de superfície, obtida através da média aritmética da emissividade das bandas 31 e 32 do produto MOD11-A2, como proposto por Bisht *et al.* (2005); T_s é a temperatura da superfície (em Kelvin), obtida através do produto MOD11-A2.

O albedo é uma medida adimensional e varia segundo as características da superfície, a razão entre a radiação solar direta e a difusa em função do ângulo zenital solar. Para a estimativa do albedo instantâneo, foram utilizados albedos provenientes do cômputo de dois tipos de produtos (MOD09-A1 - refletância de superfície; e o albedo já processado com dados do MODIS-Terra/Aqua - MCD43-A3). Isso foi feito para comparação e validação do produto de albedo disponível (MCD43-A3).

Para estimar o albedo (α) utilizando o produto MOD09-A1, foi utilizada a formulação de conversão proposta por Liang (2000) assim como apresentado na Eq. (8):

$$\alpha = 0,160\alpha_1 + 0,291\alpha_2 + 0,243\alpha_3 + 0,116\alpha_4 + 0,112\alpha_5 + 0,081\alpha_7 - 0,0015 \quad (8)$$

em que $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_7$ representam respectivamente as refletâncias monocromáticas (razão entre o fluxo de radiação solar refletido e o fluxo de radiação solar incidente) referentes às bandas de 1 a 7 do sensor MODIS, as quais são direcionadas para aplicações terrestres. Além da aplicação da formulação de Liang (2000), foi aplicado o fator multiplicativo de correção para o produto MOD09-A1. Já para o cômputo do albedo com o produto MCD43-A3, foi feita apenas a aplicação do fator de conversão correspondente ao produto.

O Rn para condições de céu claro foi estimado de duas formas, que diferem quanto à forma de cômputo dos albedos, que se deu tanto utilizando o albedo proveniente do produto MOD09-A1, como utilizando o produto de albedo pronto, MCD43-A3.

3.1. Análises estatísticas

Para análise dos resultados e tornar possível a relação existente entre os parâmetros estudados, foram utilizados o Erro Médio Percentual (EMP), Erro Médio Absoluto (EMA), Erro Absoluto (EA) e o Erro Percentual (EP) (Wilks, 2006), dados de acordo com as Eqs. (9) a (12) apresentadas a seguir:

$$EMP = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{x'_i - x_i}{x_i} \right| \quad (9)$$

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x'_i - x_i| \quad (10)$$

$$EA = |x_i - x'_i| \quad (11)$$

$$EP = \frac{EA}{x_i} \times 100 \quad (12)$$

em que x_i é o valor observado, x'_i é o valor estimado e N é o número de observações.

Na análise de regressão dos gráficos de dispersão dos dados, foi analisado o coeficiente de determinação (R^2), que é o grau de ajuste da reta estimada ao conjunto de dados, e que indica a proporção da variação total na variável dependente y que é explicada pela variação da variável independente x .

Também foi realizado o teste (estatístico) de hipóteses t -Student, do tipo bicaudal, para determinar a significância das correlações ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

4. Resultados e Discussão

4.1. Análise do albedo

Os resultados do cômputo do albedo para a área de caatinga em recuperação, mostrados na Tabela 2, deu-se da seguinte maneira: com relação ao produto de albedo pronto ($\alpha_{MCD43-A3}$), o valor mínimo foi de 11% e o valor máximo de 18% para os dias 06/03/2013 e 12/07/2013, respectivamente; para o albedo calculado através do MOD09-A1 ($\alpha_{MOD09-A1}$), os valores variaram entre 11% e 27% para os dias 22/03/2013 e 06/09/2013, respectivamente, em que a

Tabela 2 - Resultados do cômputo dos albedos para a área de caatinga em recuperação, utilizando os produtos MCD43-A3 e MOD09-A1, comparados com os dados medidos, e seus respectivos erros percentuais (EP), erro médio percentual (EMP) e erro médio absoluto (EMA).

DOA	Data	α_{medido}	$\alpha_{MCD43-A3}$	EP (%)	$\alpha_{MOD09-A1}$	EP (%)
25	25/01/2013	0,13	0,18	34,6	0,15	12,3
33	02/02/2013	0,13	0,16	19,2	0,21	57,7
57	26/02/2013	0,12	0,16	36,7	0,20	63,3
65	06/03/2013	0,13	0,11	15,4	0,12	7,7
81	22/03/2013	0,12	0,16	30,8	0,11	9,2
105	15/04/2013	0,12	0,14	18,3	0,13	5,8
137	17/05/2013	0,11	0,17	50,0	0,18	66,4
169	18/06/2013	0,12	0,14	17,5	0,12	3,3
193	12/07/2013	0,13	0,18	34,6	0,14	9,2
209	28/07/2013	0,13	0,15	15,4	0,14	10,0
217	05/08/2013	0,12	0,15	27,5	0,16	35,0
233	21/08/2013	0,11	0,14	29,1	0,12	4,5
249	06/09/2013	0,11	0,17	50,0	0,27	144,5
281	08/10/2013	0,12	0,14	16,7	0,11	9,2
289	16/10/2013	0,11	0,13	20,9	0,12	5,4
313	09/11/2013	0,11	0,14	27,3	0,19	73,6
329	25/11/2013	0,11	0,13	21,8	0,12	4,5
361	27/12/2013	0,10	0,17	68,0	0,13	32,0
α Médio =		0,12	0,15		0,15	
EMP (%) =			25,3		30,8	
EMA =			0,03		0,04	

variação de α medido (α_{medido}) foi de 10% a 13%, com valor médio de 12%. Em aplicações para o sertão pernambucano Silva *et al.* (2013) verificaram que em regiões que sofreram ações antrópicas, principalmente as áreas de cultivos irrigados as margens do rio São Francisco e na região central das imagens os valores médios encontrados para o albedo ficaram entre 16 a 40%.

O erro médio percentual (EMP) para a área em recuperação (Tabela 2) foi de 25,26% para o $\alpha_{MCD43-A3}$ e 30,77% para o $\alpha_{MOD09-A1}$; e o erro médio absoluto (EMA) foi de 3% para o $\alpha_{MCD43-A3}$ e de 4% para o $\alpha_{MOD09-A1}$. Isso demonstra que o produto de albedo pronto ($\alpha_{MCD43-A3}$) proporcionou um resultado mais satisfatório que o albedo calculado com a metodologia proposta por Liang (2000) ($\alpha_{MOD09-A1}$). Os valores encontrados para o albedo estão em concordância com os obtidos por Cunha *et al.* (2009), em um estudo para a área de caatinga, que obtiveram valores médios de albedo variando de 10% a 26%.

Já para a área de caatinga degradada, os resultados mostrados na Tabela 3, demonstram que o $\alpha_{MCD43-A3}$ variou de 21% a 11% para os dias 22/03/2013 e 15/04/2013, respectivamente; enquanto que o $\alpha_{MOD09-A1}$ variou entre 22% e 11% para os dias 15/04/2013 e 27/12/2013, respectivamente. Entretanto, o α medido variou de 18% a 22%, com uma média de 20%. De acordo com Weber (2011), o albedo apresenta grande variabilidade de local para local, sendo altamente dependente do ângulo de incidência da radiação e do tipo de cobertura da superfície. Em uma

Tabela 3 - Resultados do cômputo dos albedos para o ponto da torre experimental em área de caatinga degradada, utilizando os produtos MCD43-A3 e MOD09-A1, comparados com os dados medidos, e seus respectivos erros percentuais (EP), erro médio percentual (EMP) e erro médio absoluto (EMA).

DOA	Data	α_{medido}	$\alpha_{MCD43-A3}$	EP (%)	$\alpha_{MOD09-A1}$	EP (%)
81	22/03/2013	0,22	0,21	4,5	0,19	14,5
105	15/04/2013	0,21	0,11	47,6	0,22	5,7
137	17/05/2013	0,20	0,20	2,0	0,16	18,0
169	18/06/2013	0,21	0,17	19,0	0,14	35,7
193	12/07/2013	0,20	0,17	17,5	0,17	16,5
209	28/07/2013	0,21	0,17	17,6	0,20	6,7
217	05/08/2013	0,20	0,17	13,0	0,14	30,5
233	21/08/2013	0,21	0,18	16,7	0,16	24,8
249	06/09/2013	0,19	0,18	7,9	0,15	19,5
281	08/10/2013	0,20	0,19	3,0	0,22	9,0
289	16/10/2013	0,19	0,16	14,2	0,20	3,7
313	09/11/2013	0,19	0,11	42,1	0,19	1,6
361	27/12/2013	0,18	0,17	6,1	0,11	37,8
α Médio =		0,20	0,17		0,17	
EMP (%) =			16,3		17,2	
EMA =			0,03		0,03	

mesma área, os valores de albedo variam continuamente no tempo e de maneira distinta para cada tipo de cobertura do solo, em função do desenvolvimento das culturas e da fenologia da vegetação natural.

O erro médio percentual (EMP) para a área degradada foi de 16,3% para o $\alpha_{\text{MCD43-A3}}$ e 17,2% para o $\alpha_{\text{MOD09-A1}}$; e o EMA foi 3% para ambos os tipos de cômputo do albedo. O que indica mais uma vez que, nesse caso, e do mesmo modo que na área em recuperação, o produto de albedo pronto teve uma maior precisão, se comparado ao albedo calculado ($\alpha_{\text{MOD09-A1}}$).

Conforme Santos *et al.* (2015), uma possível explicação para o fato de o albedo medido vir a ser maior que o obtido com imagens de satélite pode ser resultante da questão temporal: o medido resulta de medições sobre intervalos de tempo de 30 minutos, ou mais, enquanto que os baseados em imagens são estimativas instantâneas.

Os valores de α estimados com as duas metodologias foram maiores na área degradada, evidentemente, possivelmente devido a presença de maiores áreas compostas por solo exposto, resultando em média de 17% para ambas, no entanto observou-se que α medido na torre micrometeorológica teve média de 20%. Nesse caso, pode-se observar uma subestimação dos valores obtidos com as duas propostas.

4.2. Análise do saldo de radiação

Nas Figs. 2 e 3 estão representadas as distribuições espaciais do Rn sobre o estado da Paraíba, para o ano de 2013, calculados a partir do produto de $\alpha_{\text{MCD43-A3}}$ (Fig. 2) e do $\alpha_{\text{MOD09-A1}}$ (Fig. 3).

O ano de 2013 foi um ano de grande estiagem, e a irregularidade de chuvas foi presente durante todo este ano. De acordo com pesquisa realizada pelo INSA (2015), os meses de abril a julho de 2013, foram os meses em que a vegetação apresentou melhores condições hídricas; portanto, foram considerados os meses mais chuvosos desse ano, o que indica uma diminuição do Rn e um aumento do NDVI. A partir dos registros diários de precipitação pluvial na estação meteorológica da Embrapa Algodão (Fig. 4) e em comparação aos dias com obtenção de imagens para este estudo verifica-se que até meados do mês de abril (21 de abril de 2013) os volumes máximos diários de precipitação não ultrapassam os 30 mm.dia⁻¹ e são verificados períodos secos, principalmente entre os dias 21/01 a 20/02, tal fato influencia diretamente sobre a resposta espectral do sensor do satélite no registro das imagens iniciais do presente estudo (DOA 25 e 33). Todavia, entre o período que se estende entre os dias 21/04 até 29/08 verificam-se vários episódios de precipitações diárias superiores aos 25mm. Nesse período, são registradas 7 imagens do sensor MODIS, os grandes acumulados de precipitação associados à presença intensa de nebulosidade atuam diretamente na disponibilidade de umidade no sistema terra-atmosfera,

e visivelmente verificado nas Figs. 2 e 3, o Rn foi consideravelmente menor nos DOA 169 (h), 193 (i), 209 (j) na região semiárida estudada, tal fator pode ser justificado pelo período chuvoso inserido no intervalo de obtenção das imagens.

Os valores do Rn computados para o MODIS/Terra no instante da passagem do satélite, referentes as duas torres micrometeorológicas experimentais, situadas em área de caatinga em recuperação e degradada, localizadas na região de Campina Grande, Estado da Paraíba, variaram da seguinte maneira para a área em recuperação (como mostrado na Tabela 4): os resultados de Rn obtidos a partir do $\alpha_{\text{MCD43-A3}}$, variaram entre 565,6 W/m² e 781,4 W/m² para os dias 17/05/2013 e 08/10/2013, respectivamente; já os resultados de Rn obtidos com o $\alpha_{\text{MOD09-A1}}$, variaram entre 641,3 W/m² e 811,9 W/m² para os dias 25/01/2013 e 08/10/2013, respectivamente. Entretanto, os valores máximo e mínimo de Rn medidos no período estudado foram 482,9 W/m² e 727,0 W/m², para os dias 12/07/2013 e 08/10/2013, respectivamente.

Para a área em recuperação, o EMP para Rn com o $\alpha_{\text{MCD43-A3}}$ foi de 17,5% e o EMA foi de 96,6 W/m²; o EMP para Rn a partir do albedo com o $\alpha_{\text{MOD09-A1}}$ foi de 16,9% e o EMA foi 94,3 W/m². Já para a área degradada, houve variação entre os valores de Rn da seguinte maneira (como mostrado na Tabela 5): os resultados obtidos com o MCD43-A3, variaram entre 557,8 W/m² e 747,6 W/m² para os dias 12/07/2013 e 06/09/2013, respectivamente; já os resultados de Rn obtidos com o MOD09-A1, variaram entre 545,0 W/m² e 767,8 W/m² para os dias 15/04/2013 e 06/09/2013, respectivamente. Os valores máximo e mínimo de Rn medidos para o período de estudo da área degradada foram 401,3 W/m² e 724,5 W/m² para os dias 06/09/2013 e 08/10/2013, respectivamente.

O resultado do Rn obtido a partir do produto de albedo pronto foi mais satisfatório na aplicação para a área degradada, onde o EMP foi de 16,5% e seu EMA foi de 79,9 W/m²; em contrapartida, o Rn obtido a partir do MOD09-A1 foi mais satisfatório para a área em recuperação, com EMP de 16,9% e EMA de 94,3 W/m² (para a área degradada, o EMP de Rn obtido com este mesmo produto foi de 21,5% e EMA de 109,6 W/m²). Indicando um erro elevado para esta aplicação comparado com a metodologia utilizada por Santos *et al.* (2015) para áreas de cerrado e cana-de-açúcar.

Bisht e Bras (2010) obtiveram resultados mais satisfatórios na estimativa do Rn , porém, a metodologia completa utilizada em seu trabalho dispõe de vários outros produtos MODIS, e várias outras vertentes; e a área onde foi aplicada a pesquisa não corresponde ao tipo de área que foi estudada neste trabalho, visto que a Caatinga tem muitas peculiaridades. Em sua pesquisa, Kim e Hogue (2013) observaram que as incertezas (fontes de erros) significativas nas estimativas, podem resultar das diferenças evi-

dentes de escala entre os valores estimados com imagens MODIS e valores medidos *in situ*.

A Fig. 5 representa as dispersões entre R_n calculado com os dois tipos de cômputo de albedo (MCD43-A3 e

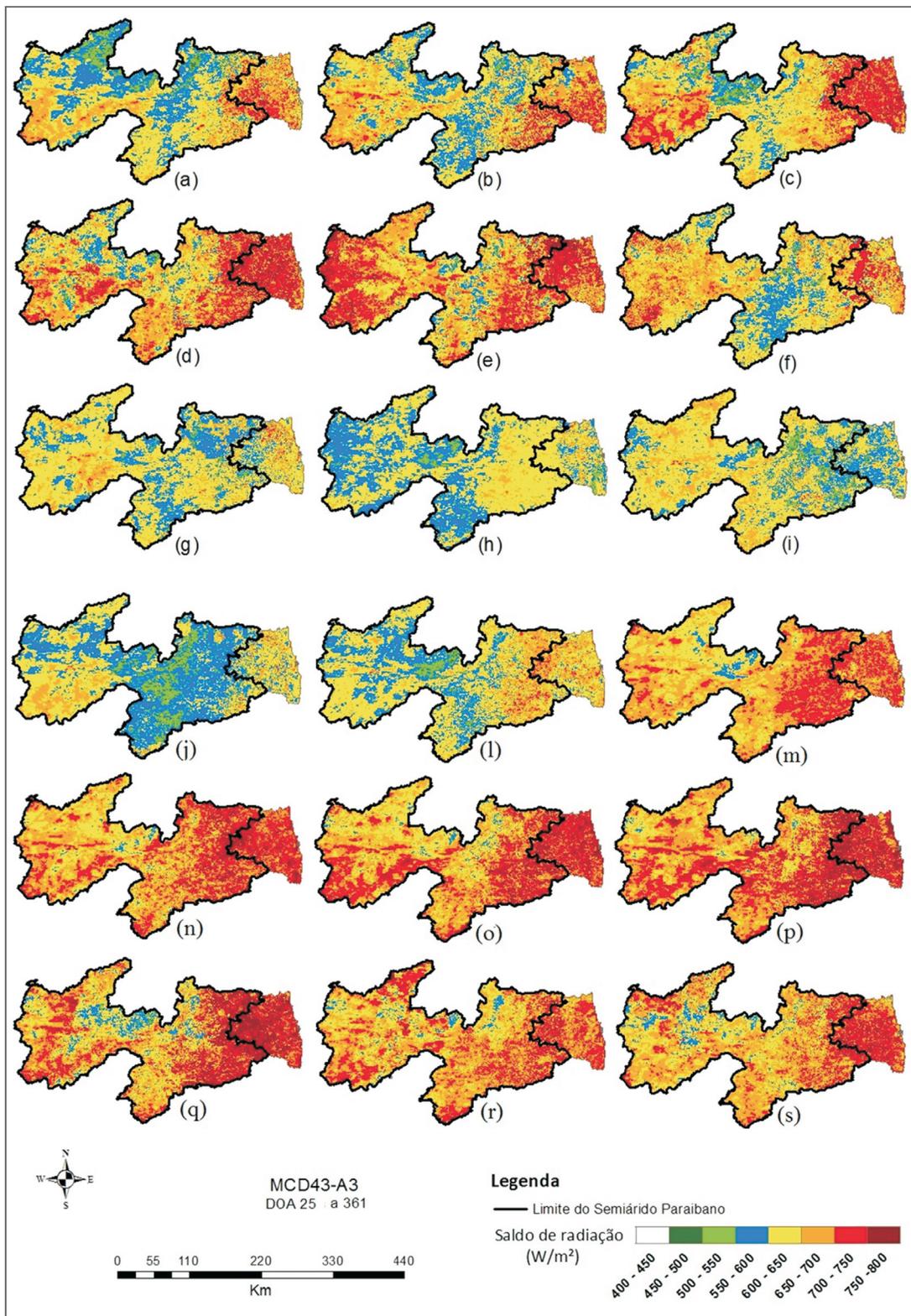


Figura 2 - Saldo de radiação com o MCD43-A3 referentes aos dias de ordem do ano: 25 (a), 33 (b), 57 (c), 65 (d), 81 (e), 105 (f), 137 (g), 169 (h), 193 (i), 209 (j), 217 (l), 233 (m), 249 (n), 281 (o), 289 (p), 313 (q), 329 (r) e 361 (s).

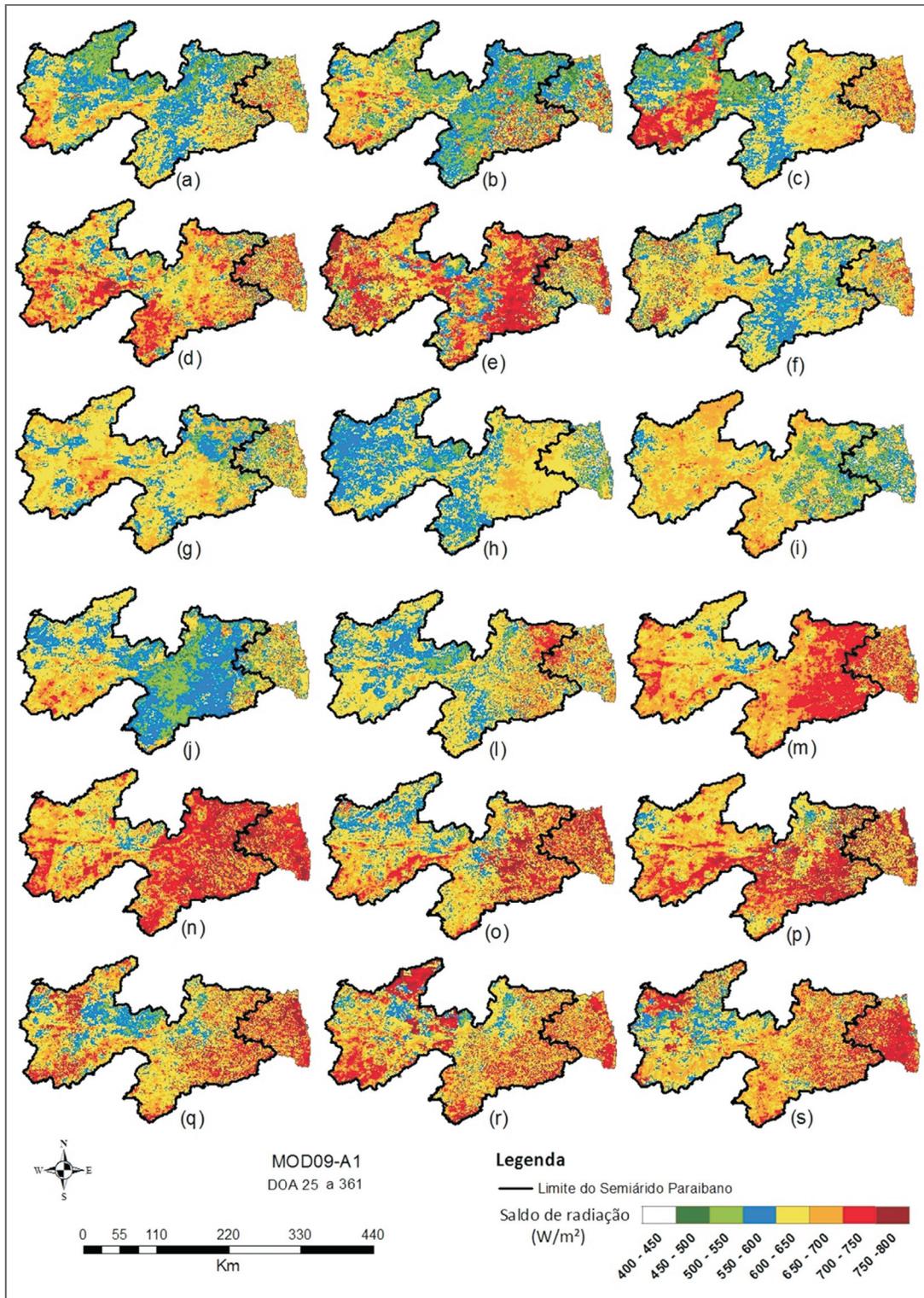


Figura 3 - Saldo de radiação com o MOD09-A1 referentes aos dias de ordem do ano: 25 (a), 33 (b), 57 (c), 65 (d), 81 (e), 105 (f), 137 (g), 169 (h), 193 (i), 209 (j), 217 (l), 233 (m), 249 (n), 281 (o), 289 (p), 313 (q), 329 (r) e 361 (s).

MOD09-A1), para ambas as áreas estudadas. Observa-se que o coeficiente de determinação foi maior para a área em recuperação, com $R^2 = 0,78$, e menor para a área degradada, com $R^2 = 0,61$.

A partir do Rn estimado, aplicou-se o teste estatístico t -Student (bicaudal) para determinar a significância dos coeficientes de correlação ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). De acordo com a análise estatística, a metodo-

logia utilizada apresenta uma melhor qualidade do ajuste para a área em recuperação, uma vez que a variação expli-

cada de ambos os modelos (utilizando o MCD43-A3 e o MOD09-A1) foi de 78%, enquanto que na área degradada

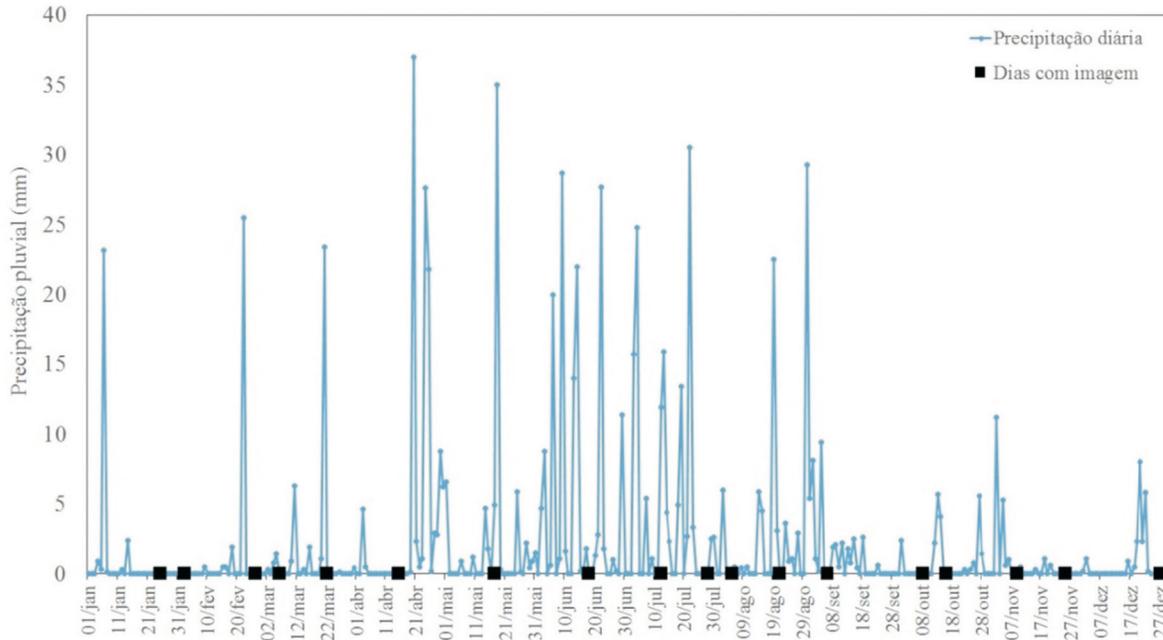


Figura 4 - Distribuição diária da precipitação pluviométrica no ano de 2013 para o município de Campina Grande-PB (Estação INMET/Embrapa-Algodão) e registros dos dias com imagens MODIS Terra/Aqua.

Tabela 4 - Resultados do saldo radiativo, utilizando albedos obtidos com o MOD43-A3 e MOD09-A1, comparados com os dados medidos na torre em área de caatinga em recuperação, e seus respectivos erros percentuais (EP), erro médio percentual (EMP) e erro médio absoluto (EMA).

DOA	Data	R_n medido (W/m^2)	R_n MCD43-A3 (W/m^2)	EP (%)	R_n MOD09-A1 (W/m^2)	EP (%)
25	25/01/2013	666,2	615,8	7,0	641,3	3,7
33	02/02/2013	499,6	651,7	30,4	609,2	21,9
57	26/02/2013	641,0	680,9	6,2	652,5	1,8
65	06/03/2013	640,1	692,3	8,2	683,4	6,8
81	22/03/2013	655,5	746,2	13,8	790,4	20,6
105	15/04/2013	629,9	634,8	0,8	647,8	2,8
137	17/05/2013	507,1	565,6	11,5	552,1	8,9
169	18/06/2013	562,7	639,6	13,6	653,0	16,0
193	12/07/2013	483,0	620,8	28,5	646,9	33,9
209	28/07/2013	600,4	602,3	0,3	607,6	1,2
217	05/08/2013	535,0	651,9	21,8	644,5	20,5
233	21/08/2013	578,5	720,7	24,6	744,1	28,6
249	06/09/2013	492,7	714,4	45,0	623,6	26,6
281	08/10/2013	727,0	781,4	7,5	811,9	11,7
289	16/10/2013	636,9	774,8	21,7	791,8	24,3
313	09/11/2013	630,2	703,7	11,7	658,1	4,4
329	25/11/2013	581,3	746,6	28,5	764,1	31,5
361	27/12/2013	494,3	656,5	32,8	687,4	39,1
R_n Médio(W/m^2) =		586,7	677,8		678,3	
EMP (%) =			17,5		16,9	
EMA (W/m^2) =			96,6		94,3	

Tabela 5 - Resultados do saldo radiativo, utilizando albedos obtidos com o MOD43-A3 e MOD09-A1, comparados com os dados medidos na torre em área de caatinga degradada, e seus respectivos erros percentuais (EP), erro médio percentual (EMP) e erro médio absoluto (EMA).

DOA	Data	Rn medido (W/m ²)	Rn MCD43-A3 (W/m ²)	EP (%)	Rn MOD09-A1 (W/m ²)	EP (%)
81	22/03/2013	677,3	662,7	2,1	683,1	0,7
105	15/04/2013	659,2	642,3	2,6	545,0	17,3
137	17/05/2013	594,4	603,4	1,5	635,8	7,0
169	18/06/2013	622,6	629,6	1,1	649,5	4,3
193	12/07/2013	483,9	557,8	15,2	556,3	14,9
209	28/07/2013	628,4	576,4	8,2	559,1	11,0
217	05/08/2013	454,5	645,7	42,0	675,3	48,5
233	21/08/2013	612,8	691,1	12,8	705,7	15,2
249	06/09/2013	401,3	747,6	86,3	767,8	91,3
281	08/10/2013	724,5	640,5	11,6	618,6	14,6
289	16/10/2013	716,6	724,3	1,1	692,2	3,4
313	09/11/2013	710,9	711,6	0,1	635,0	10,7
361	27/12/2013	535,3	693,3	29,5	743,9	39,0
Rn Médio (W/m ²) =		601,7	655,9		651,3	
EMP (%) =			16,5		21,4	
EMA (W/m ²) =			79,9		109,6	

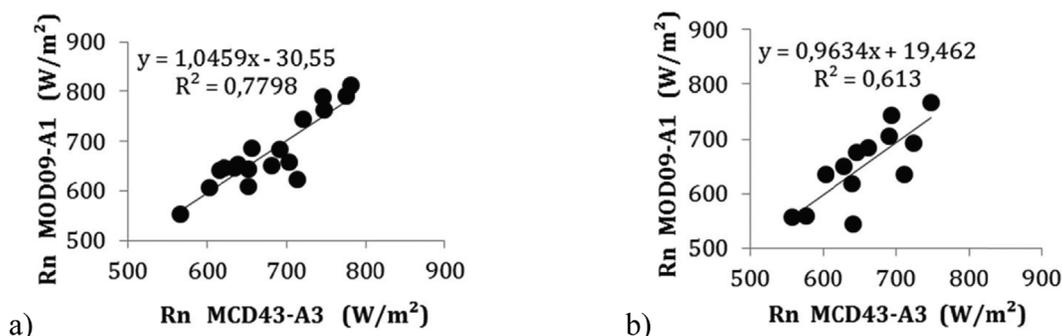


Figura 5 - Correlação entre o saldo de radiação obtido com MOD09-A1 e o MCD43-A3 para as áreas em recuperação (a) e degradada (b), para os respectivos dias estudados em cada área.

foi de 61%. Na Tabela 6, observa-se que a hipótese nula ($\rho = 0$), ao nível de significância de 5%, foi aceita para ambas as áreas estudadas, pois os valores de t-calculado recaíram na região de aceitação da curva de distribuição do teste. Portanto, não há uma relação de significância entre os valores de Rn estimados com o MCD43-A3 em relação aos estimados com o MOD09-A1.

Para uma melhor análise, foram gerados mapas de NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) a fim de obter uma correlação entre os valores do Rn e o NDVI do estado da Paraíba. Para tanto, foi utilizado o produto MOD13-Q1 do MODIS/Terra, que contém dentre suas composições o NDVI, uma vez que a vegetação (tipo, condição hídrica, tamanho, distribuição espacial da folhagem) influencia nos valores do albedo e este, por sua vez, é um forte fator na determinação do saldo de radiação. A Fig. 6 mostra a espacialização do NDVI para o estado da

Paraíba. De acordo com INSA (2015), os meses de abril a julho de 2013 foram os meses em que a vegetação apresentou melhores condições hídricas, portanto, foram considerados os meses mais chuvosos desse ano, o que indica uma diminuição do Rn e um aumento do NDVI.

Na análise geral do NDVI para o ano de 2013, tem-se que a classe predominante na região semiárida da Paraíba é a de valores entre 0,1 a 0,3 e, logo em seguida, a classe entre 0,3 e 0,5. De acordo com os resultados encontrados por

Tabela 6 - Resultados da aplicação do teste estatístico t-Student, onde R² é o coeficiente de determinação, r é o coeficiente de correlação, gl é o número de graus de liberdade, t-calculado e t-crítico.

Área	R ²	r	gl	t-calculado	t-crítico
Em recuperação	0,779	0,883	33	-0,025	2,035
Degradada	0,613	0,783	23	0,182	2,069

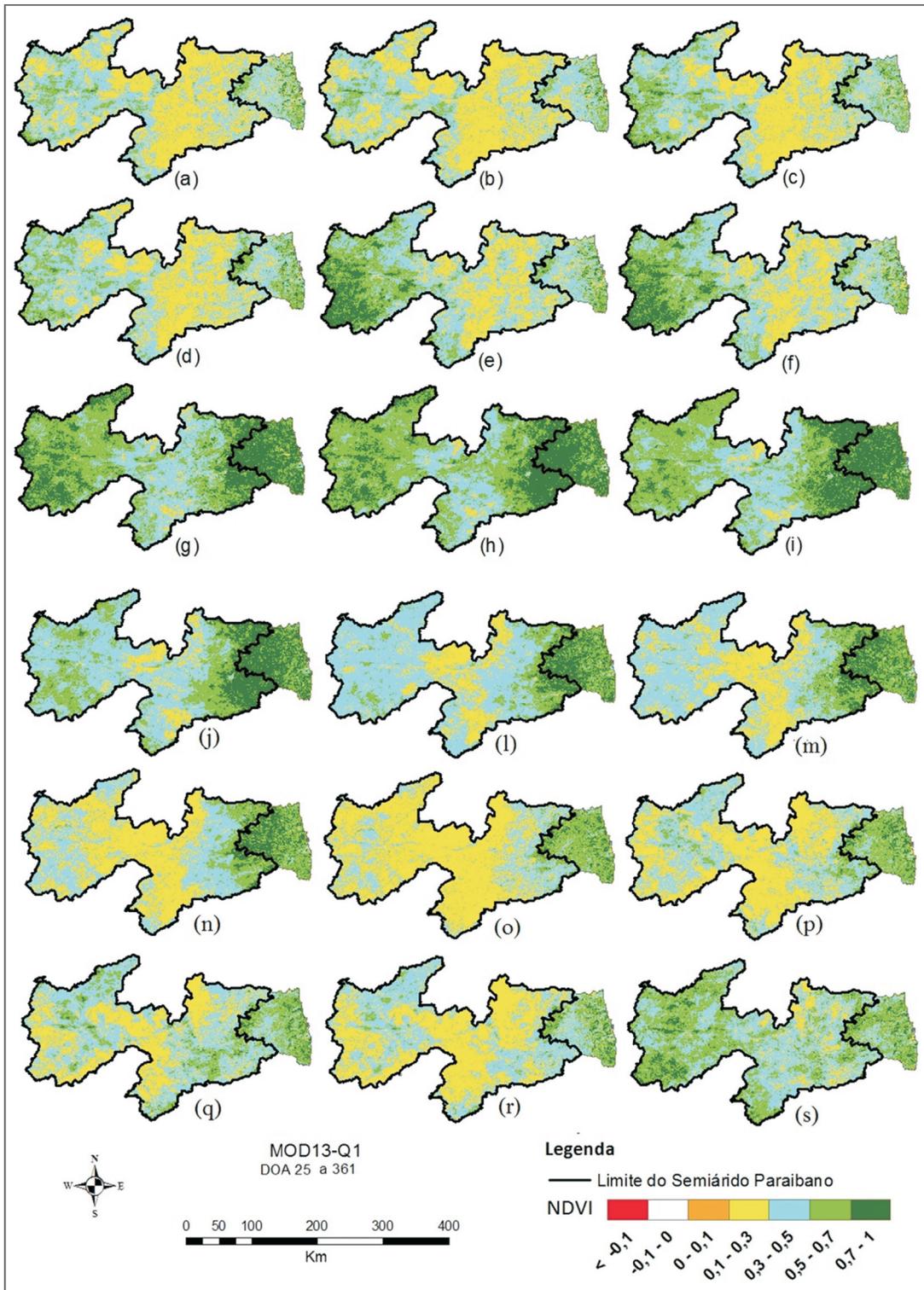


Figura 6 - Mapas do NDVI referentes aos dias de ordem do ano: 25 (a), 33 (b), 57 (c), 65 (d), 81 (e), 105 (f), 137 (g), 169 (h), 193 (i), 209 (j), 217 (l), 233 (m), 249 (n), 281 (o), 289 (p), 313 (q), 329 (r) e 361 (s).

Rodrigues *et al.* (2009), como esperado, esses resultados são indicadores de áreas com vegetação bastante rala ou até mesmo sem vegetação, o que realmente caracteriza uma vegetação do semiárido brasileiro.

Para a área em recuperação, o NDVI apresentou mínimo de 0,28 no DOA 361 (correspondente ao mês de dezembro, época da estação seca) e máximo de 0,82 no DOA 193 (correspondente ao mês de julho, época do período chu-

Tabela 7 - Resultados estimados do saldo radiativo (para os dois tipos de cômputo) - R_n , radiação de onda curta incidente - $R_{s\downarrow}$ e NDVI, para a área em recuperação e degradada.

DOA	Área em recuperação				Área degradada			
	R_n MCD43-A3 (W/m^2)	R_n MOD09-A1 (W/m^2)	$R_{s\downarrow}$ estimada	NDVI estimado	R_n MCD43-A3 (W/m^2)	R_n MOD09-A1 (W/m^2)	$R_{s\downarrow}$ estimada	NDVI estimado
25	615,8	641,3	863,6	0,44	NPD	NPD	NPD	NPD
33	651,7	609,2	848,9	0,39	NPD	NPD	NPD	NPD
57	680,9	652,5	886,8	0,32	NPD	NPD	NPD	NPD
65	692,3	683,4	920,9	0,39	NPD	NPD	NPD	NPD
81	746,2	790,4	927,1	0,40	662,7	683,1	927,3	0,23
105	634,8	647,8	866,6	0,40	642,3	545,0	868,6	0,23
137	565,6	552,1	734,4	0,77	603,4	635,8	811,3	0,44
169	639,6	653,0	782,0	0,77	629,6	649,5	779,6	0,63
193	620,8	646,9	799,6	0,82	557,8	556,3	707,0	0,65
209	602,3	607,6	742,4	0,79	576,4	559,1	745,0	0,64
217	651,9	644,5	791,4	0,63	645,7	675,3	845,3	0,44
233	720,7	744,1	874,4	0,37	691,1	705,7	876,0	0,49
249	714,4	623,6	876,1	0,60	747,6	767,8	929,0	0,43
281	781,4	811,9	980,3	0,39	640,5	618,6	909,2	0,31
289	774,8	791,8	977,2	0,33	724,3	692,2	956,2	0,38
313	703,7	658,1	895,1	0,63	711,6	635,0	920,0	0,29
329	746,6	764,1	921,9	0,43	NPD	NPD	NPD	NPD
361	656,5	687,4	853,6	0,28	693,3	743,9	893,7	0,26

NPD = não possui dados.

vos). Para a área degradada, o índice apresentou mínimo de 0,23 para o DOA 81 (período de estiagem) e máximo de 0,65 para o DOA 193 (período chuvoso).

A área destacada da Tabela 7 aponta os dados no período chuvoso da região, onde é possível notar o aumento do NDVI, a menor incidência de radiação de onda curta e valores mais baixos de saldo de radiação, para ambas as áreas analisadas.

5. Conclusões

Diante dos resultados encontrados, pode-se constatar a eficácia do produto de albedo pronto (MCD43-A3), tanto para a área de caatinga em recuperação, como para a área de caatinga degradada, corroborado pela validação feita entre os dados medidos e os estimados com o produto de albedo pronto e o produto do albedo calculado através do MOD09-A1. Conclui-se que o EMP do MCD43-A3 foi mais satisfatório que o EMP do albedo calculado pelo MOD09-A1 em ambas as áreas (em recuperação e degradada). Entretanto, o EMP relacionado ao albedo MCD43-A3 deu-se mais satisfatório na área degradada, o que mostra uma forte indicação que a metodologia proposta tem maior eficácia em áreas com o solo mais descoberto. Todavia, não houve relação significativa entre α MCD43-A3 e α MOD09-A1, pois de acordo com a análise estatística, o modelo

proposto não apresentou uma boa qualidade do ajuste para a área em recuperação nem para a área degradada.

Não houve uma relação de significância entre os valores de R_n estimados com o MCD43-A3 em relação aos estimados com o MOD09-A1. E de acordo com a análise estatística, a metodologia apresentou uma melhor qualidade do ajuste para a área em recuperação, onde para esta, a variação explicada de ambos os modelos (utilizando o MCD43-A3 e o MOD09-A1) foi de 78% e para a área degradada foi de 61%.

O tamanho do pixel das imagens com relação à área de abrangência dos sensores de radiação pode ser um fator agravante para ocasionar superestimativas ou subestimativas do albedo e, conseqüentemente, (juntamente com a superestimativa/subestimativa da radiação de onda curta incidente) do saldo de radiação. Todavia, embora os dados passem por inúmeras correções para chegar ao produto final, erros sistemáticos são inerentes à aquisição de dados via plataforma orbital, onde uma das principais causas são os efeitos atenuantes da atmosfera.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento do Projeto de Pesquisa sob número 446172/2015-4 e da Bolsa de Produtividade em Pesquisa,

assim como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento do Projeto de Pesquisa intitulado “Análise e Previsão dos Fenômenos Hidrometeorológicos Intensos do Leste do Nordeste Brasileiro” - Edital Pró-Alertas nº 24/2014 (Processo nº. 88887.091737/2014-01).

Referências

- ARYA S.P., 1988. **An introduction to micrometeorology**. Academic Press, San Diego. 420 pp.
- AYOOLA, M.A.; SUNMONU, L.A.; BASHIRU, M.I.; JEGEDE, O.O. Measurements of net all-wave radiation at a tropical location, Ile-Ife, Nigeria. **Atmosfera**, v. 27, p. 305-315, 2014.
- BISHT, G.; BRAS, R.L. Estimation of net radiation from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer over the continental United States. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, n. 6, p. 2448-2462, 2011.
- BISHT, G.; BRAS, R.L. Estimation of net radiation from the MODIS data under all sky conditions: Southern Great Plains case study. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 1522-1534, 2010.
- BISHT, G.; VENTURINI, V.; ISLAM, S.; JIANG, L.E. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. **Remote Sensing of Environment**, v. 97, p. 52-67, 2005.
- BLAD, B.L.; WALTER-SHEA, E.A.; MESARCH, M.A.; HAYS, C.J.; STARKS, P.J.; DEERING, D.W.; ECK, T.F. Estimating net radiation with remotely sensed data: results from KUREX-91 and FIFE studies. **Remote Sensing Review**, v. 17, n. 1-4, p. 55-71, 1998.
- CARMONA, F.; RIVAS, R.; CASELLES, V. Development of a general model to estimate the instantaneous, daily, and daytime net radiation with satellite data on clear-sky days. **Remote Sensing of Environment**, v. 171, p. 1-13, 2015.
- CUNHA, A.P.M.A.; CANAVESI, V.; VIEIRA, R.M.S.P.; ALVALÁ, R.C.S. **Validação do albedo da superfície terrestre obtido a partir de imagens do sensor MODIS em área de Caatinga**. In SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, III, 2009, Canela. Anais do Simpósio Internacional de Climatologia. 2009.
- FOKEN, T. The energy balance closure problem - An overview. **Ecological Application**, v. 18, p. 1351-1367, 2008.
- HWANG, K.; CHOI, M.; LEE, S.; SEO, J.W. Estimation of instantaneous and daily net radiation from MODIS data under clear sky conditions: a case study in East Asia. **Irrigation Science**, v.31, n.5, p.1173-1184, 2013.
- INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO (INSA). **Pesquisadores divulgam melhorias no Índice de vegetação do Semiárido com recentes chuvas**. Disponível em: http://www.insa.gov.br/noticias/pesquisadores-divulgam-melhorias-no-indice-de-vegetacao-do-semiarido-com-recentes-chuvas/#.VckfQ_IViko. Acesso em: 10 de agosto de 2015.
- IZIOMON, M.G.; MAYER, H.; MATZARAKIS, A. Empirical models to estimate net radiative flux: a case study for three mid-latitude sites with orographic variability. **Astrophys. Space Sci.**, v. 263, p. 313-330, 2000.
- KIM, J.; HOGUE, T.S. Evaluation of a MODIS triangle-based evapotranspiration algorithm for semi-arid regions. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 7, p. 1-19, 2013.
- LIANG, S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I Algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, p. 213-238, 2000.
- LIANG, S.; WANG, K.; ZHANG, X.; WILD, M. Review on estimation of land surface radiation and energy budgets from ground measurement, remote sensing and model simulations. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 3, p. 225-240, 2010.
- MASUOKA, E.; FLEIG, A.; WOLFE, R.E.; PATT, F. Key characteristics of MODIS data products. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1313-1323, 1998.
- MIRA, M.; OLIOSO, A.; GALLEGO-ELVIRA, B.; COURAU, D.; GARRIGUES, S.; MARLOIE, O.; HAGOLLE, O.; GUILLEVIC, P.; BOULET, G. Uncertainty assessment of surface net radiation derived from Landsat images. **Remote Sensing of Environment**, v. 175, p. 251-270, 2016.
- NIEMELÄ, S.; RÄISÄNEN, P.; SAVIJÄRVI, H. Comparison of surface radiative flux parameterizations: Part I: Longwave radiation. **Atmospheric Research**, v. 58, n. 1, p. 1-18, 2001.
- PRATA, A.J. A new long-wave formula for estimating downward clear sky radiation at the surface. **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, v. 122, p. 1127-1151, 1996.
- RODRIGUES, J.O.; ANDRADE, E.M.; TEIXEIRA, A.S.; SILVA, B.B. Sazonalidade de variáveis biofísicas em regiões semiáridas pelo emprego do sensoriamento remoto. **Revista de Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 3, p. 452-465, 2009.
- SANTOS, F.A.C.; SANTOS, C.A.C.; SILVA, B.B.; ARAÚJO, A.L.; CUNHA, J.E.B.L. Desempenho de metodologias para estimativa do saldo de radiação a partir de imagens Modis. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, p. 295-306, 2015.
- SANTOS, F.A.C.; SILVA, B.B.; ARAÚJO, A.L.; SILVA, M.T.; BRAGA, A.C. Comparação de Modelos de Estimativa da Radiação de Onda Curta a partir de dados MODIS/Terra. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 4, p. 1037-1049, 2013.
- SILVA, M.T.; SILVA, V.P.R.; SOUSA, E.P.; OLIVEIRA, S.D. **Variabilidade espaço temporal do albedo da superfície no semiárido pernambucano com base em imagens do TM/Landsat 5**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 2013, Foz do Iguaçu - PR. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. São José dos Campos: INPE, 2013. p. 7468-7475.
- SILVA, V.P.R.; CAVALCANTI, E.P.; NASCIMENTO, M.G.; CAMPOS, J.H.B.C. Análises da precipitação pluvial no Estado da Paraíba com base na teoria da entropia. **Revista Brasileira de Eng. Agrícola Ambiental**, v. 7, n. 2. p. 269-274, 2003.
- TOVAR-PESCADOR, J.; POZO-VÁZQUEZ, D.; RUIZ-ARIAS, J.A.; BATTLES, J.; LÓPEZ, G.; BOSCH, J.L. On the use of the digital elevation model to estimate the solar radiation in areas of complex topography. **Meteorological Applications**, v. 13, n. 3, p. 279-287, 2006.
- WANG, D.; LIANG, S.; HE, T.; SHI, Q. Estimating clear-sky all-wave net radiation from combined visible and shortwave infrared (VSWIR) and thermal infrared (TIR) remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**, v. 167, p. 31-39, 2015.

WEBER, E.J. **Estimativa e mapeamento da radiação solar incidente em superfícies com topografia heterogênea na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha.** Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Porto Alegre, 2011.

WILKS, D.S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences.** International Geophysics Series. 2d ed, Vol. 91, 627 p. Academic Press, 2006.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.