

Um método de estimativa de irradiação solar direta normal a partir de imagens de satélite geostacionário: resultados preliminares

Anthony Carlos Silva Porfirio¹

Juan Carlos Ceballos²

^{1,2} Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC

Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais - DSA

12630-000 - Cachoeira Paulista - SP, Brasil

¹ anthony.carlos@cptec.inpe.br, ² jcc.1943@gmail.com

Abstract. Mapping and monitoring of the direct normal irradiance (DNI) is most relevant for proper installation of heliothermic power plants using concentrating solar systems. This work presents a satellite-based method for estimating DNI and integrated direct normal solar irradiation (Q_N) which uses a minimal set of local weather information. Basic parameters for the computation of Q_N by satellite are: i) direct normal irradiance under clear sky conditions DNI_{cc} (inferred by a physical parameterization), and ii) cloud cover (estimated from images of GOES Imager VIS channel). Satellite estimations for DNI and Q_N during July 2007 were compared with measurements of solarimetric stations of SONDA network in Northeast Brazil (Petrolina, Natal and São Luís). Preliminary results suggest that accuracy of the proposed method is similar to that of models reported in the literature. DNI daily cycles in conditions of clear sky and partially cloudy were represented satisfactorily, with daily average errors ranging from -11,9 to 5,7 W m⁻². Assessed Q_N shows close linear relationship with measured values, with R^2 values as high as 0,97. MBE (Mean Bias Error) and RMSE (Root Mean Square Error) were 8,9 and 15,9%, respectively. Proposed algorithm is a promising tool for providing information of Q_N (with spatial resolution of 4x4 km), in particular over regions with unavailable in situ measurements.

Palavras-chave: direct normal irradiance, meteorological satellites, solar radiation, irradiação direta normal, satélites meteorológicos, radiação solar.

1. Introdução

Estima-se que para manter o ritmo de crescimento do Brasil, a geração de energia elétrica deverá ser duplicada ou triplicada nas próximas duas décadas (MME, 2007). A conversão da energia solar em energia elétrica é uma das alternativas atualmente propostas para complementar a matriz energética, predominantemente hidráulica.

Por estar localizado na região intertropical, o território brasileiro tem boa parte caracterizada por alta incidência de radiação solar ao longo do ano, portanto, o país apresenta grande potencial disponível para o aproveitamento dessa forma de energia renovável (Pereira et al., 2006). Destaque especial, a região Nordeste do Brasil (NEB) apresenta insolação (ou duração do brilho solar) média entre 7 e 8 horas. Áreas do NEB apresentam valores elevados de irradiação solar global diária e uma média anual comparáveis com regiões desérticas de alto potencial solar. Além disso, as variações sazonais do NEB são menores, o que pode implicar em importantes vantagens técnicas e econômicas para possíveis sistemas solares instalados nesta região (Tiba, 2000).

O recurso solar ainda é muito pouco aproveitado no nosso país apesar do grande potencial existente. Os principais entraves quanto ao seu aproveitamento são o fator econômico e a baixa eficiência dos dispositivos de captação. Por outro lado, a energia solar heliotérmica de grande porte (plantas da ordem de 100 MW) tem perspectivas de difusão dentro de um prazo de 10 a 20 anos (Sargent e Lundy, 2003). Essas usinas utilizam coletores solares concentradores, tecnologia usualmente conhecida como *Concentrating Solar Power* (CSP), assim denominados porque concentram a radiação solar. As primeiras plantas comerciais desse sistema iniciaram operação entre 1984 e 1991 no sul da Califórnia, com nove coletores solares parabólicos da ordem de 14 a 80 MW, que totalizam 354 MW de potência instalada (IEA, 2010). A única componente da radiação solar passível de ser concentrada é a irradiação

direta normal (DNI); assim, faz-se necessário o seu conhecimento acurado para o planejamento e operação eficiente desses projetos.

A DNI pode ser medida diretamente por meio de um pireliômetro acoplado a um rastreador solar, ou indiretamente, através de medidas de irradiância global (E_g) e difusa (E_d). Entretanto, as componentes DNI e E_d são pouco monitoradas na maioria das estações meteorológicas do Brasil, devido ao custo instrumental elevado e a complexidade de seu registro. A escassez de medidas de DNI à superfície impossibilita a avaliação de sua qualidade em extensas áreas. Uma alternativa para esse problema é o uso de modelos de estimativa a partir de dados satelitais, principalmente os geoestacionários GOES e METEOSAT (Ineichen et al., 2000; Perez et al., 2002; Schillings et al., 2004a; Martins et al., 2007; Vignola et al., 2007). Esses dados possuem uma cobertura contínua no espaço (resolução 4×4 km) e no tempo (intervalo de 15 minutos), cobrem grandes áreas e possuem séries longas de medição. Assim, a análise da disponibilidade de irradiância direta normal (e irradiação) mediante satélites são fundamentais para o conhecimento científico e para tomadas de decisões seguras que visem o aproveitamento eficiente desse recurso energético abundante em nosso território. Diante do exposto, o presente trabalho teve por objetivo apresentar uma metodologia de estimativa de irradiação direta normal mediante satélite geoestacionário, susceptível de ser aplicada na estimativa de potencial solar no território brasileiro. A presente contribuição se concentra na região NEB.

2. Descrição do método proposto

O método desenvolvido neste estudo baseia-se no uso combinado de um modelo físico de estimativa de irradiância direta normal sob condição de céu claro DNI_{cc} , informações meteorológicas auxiliares e imagens de refletância no canal VIS do satélite GOES. A Figura 1 apresenta um diagrama esquemático do método de estimativa de DNI por satélite (DNI_{sat}) elaborado neste estudo.

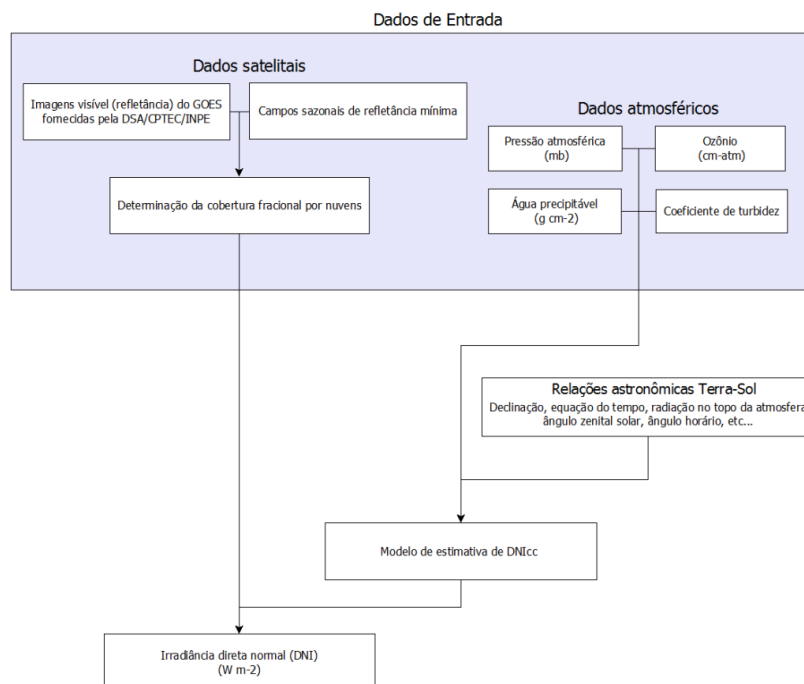


Figura 1. Diagrama esquemático do método de estimativa de DNI por satélite.

A estimativa de DNI_{cc} é realizada utilizando o modelo REST, desenvolvido por Gueymard (2003a). Validações teóricas e experimentais deste modelo foram realizadas em

diversos locais do mundo e evidenciaram uma estimativa acurada de DNI_{cc} (Gueymard, 2003b; Alam, 2006; Madkour et al. 2006). O modelo REST adota funções parametrizadas para a transmitância da radiação direta normal correspondentes aos seguintes processos: dispersão Rayleigh, espalhamento e absorção por aerossóis, absorção por ozônio, absorção por gases com distribuição uniforme, absorção pelo vapor d'água e absorção pelo dióxido de nitrogênio (NO_2). Neste estudo, a transmitância pelo NO_2 não foi considerada devido a sua pequena influência. A DNI_{cc} pode ser obtida mediante o produto das transmitâncias, como segue

$$DNI_{cc} = S T_R T_o T_g T_w T_a \quad (1)$$

onde S é a constante solar ($S_o = 1367 \text{ W m}^{-2}$) corrigida pela distância Terra-Sol, T se refere às transmitâncias T_R por dispersão Rayleigh, T_o pela coluna de ozônio atmosférico, T_g por gases com distribuição uniforme (sobretudo O_2 e CO_2), T_w pelo vapor d'água, T_a pelo aerossol. Os parâmetros atmosféricos necessários para o cômputo da DNI_{cc} são: pressão atmosférica P , conteúdo total de ozônio u_{o3} , água precipitável w , e coeficiente de turbidez de Angstrom β .

O principal fator modulador da incidência de DNI à superfície é a nebulosidade. Assim, a nebulosidade foi caracterizada seguindo uma metodologia similar a adotada por Ceballos et al. (2004) e Ceballos e Rodrigues (2008). A estimativa adota uma relação linear entre a cobertura local de nuvens C e a refletância R_{vis} observada no canal VIS do GOES. Considera-se que a refletância R_{vis} avaliada para cada pixel represente um valor intermediário entre o sinal de superfície sem nuvens (R_{min}) e o sinal com cobertura total (apenas nuvem, R_{max}). O algoritmo para estimar C consiste em reconhecer que para uma cobertura (em área) no pixel ($0 \leq C \leq 1$), então a refletância R_{vis} observada é dada por

$$R_{vis} = C R_{max} + (1 - C) R_{min} \Rightarrow C = \left(\frac{R_{vis} - R_{min}}{R_{max} - R_{min}} \right) \quad (2)$$

Esta expressão representa a cobertura média para um local que se encontra dentro do pixel considerado (entre 3 e 5 km). Claramente, dentro dessa dimensão ela se refere a cobertura por nuvens do tipo cumuliformes; outras coberturas (estratiformes, cumulonimbus, entre outras) têm localmente uma nebulosidade $C = 1$.

O algoritmo utiliza campos sazonais de R_{min} , obtidos através de imagens de refletância no canal VIS do GOES durante o período 2007-2008. Uma verificação do valor R_{max} , que representa a refletância de transição entre cobertura do tipo cumuliforme e estratiforme, foi realizada a partir do uso combinado de imagens de refletância no canal VIS e imagens de classificação de nuvens para os meses de janeiro e fevereiro de 2007. A área de estudo selecionada está compreendida entre as latitudes -5 a $-10^\circ S$ e longitude -40 a $-45^\circ W$, que abrange boa parte do semi-árido do NEB. Foi elaborado um histograma de frequência acumulada classificando quatro tipos fundamentais: superfície, cumulus, estratiformes e outros tipos de cobertura de céu. A Figura 2 ilustra este resultado. Percebe-se, por um lado, que os 10% superiores do histograma de frequência da refletância do tipo cumulus começam em torno de 0,42. Por outro lado, os primeiros 10% para o tipo estratos apresentam refletância entre 0,3 e 0,395. Portanto, esta análise sugere que o valor de $R_{max} = 0,40$ seria o mais adequado na representação de uma região de transição entre nuvens cumuliformes e estratiformes.

A partir desse conjunto de informações, as estimativas de DNI e Q_N foram realizadas. Dada a hipótese que as nuvens não transmitem radiação direta normal, a DNI_{sat} pode ser avaliada segundo a expressão

$$DNI_{sat_i} = (1 - C_i) DNI_{cc_i} \quad (3)$$

onde o subscrito i refere-se a cada horário. Esta expressão pode ser interpretada como uma irradiância média na área de um pixel. A irradiação direta normal por satélite é dada por

$$Q_{Nsat} = \sum_i (1 - C_i) (DNI_{cc})_i \delta t_i \quad (4)$$

ou seja Q_{Nsat} é a integração do fluxo DNI_{cc} ponderado com a fração de céu claro teórico $(1 - C)$.

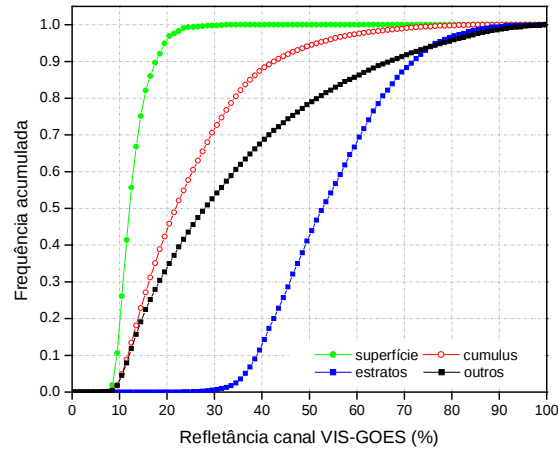


Figura 2. Histograma de frequência acumulada de tipos de nebulosidade para o semiárido do NEB, durante os meses de janeiro e fevereiro de 2007.

3. Dados e Metodologia de Trabalho

As medidas de irradiância solar global (E_g) e irradiância solar difusa (E_d) foram obtidas das estações da rede SONDA (ver <http://sonda.cptec.inpe.br>) em Petrolina-PE (9°04'S, 40°19'W, 387m), Natal-RN (5°50'S, 35°12'W, 58m) e São Luís-MA (2°35'S, 44°12'W, 40m) (registros médios a cada minuto). A DNI é calculada segundo $DNI = (E_g - E_d) / \mu$, onde μ é o cosseno do ângulo zenital. Para estimar DNI_{cc} , foram utilizados: i) dados médios anuais de P de 153 estações meteorológicas bem distribuídas no NEB e estados circunvizinhos (INMET, 2009) foram empregados para a geração de um campo médio anual mediante interpolação por meio do inverso quadrado da distância, ii) dados médios mensais de β , provenientes do sensor MODIS (Terra/Aqua), obtidos através da profundidade óptica do aerossol em 0,55 μ m via Giovanni da NASA, adotando um expoente de Angstrom $\alpha = 1,3$; iii) dados diários de água precipitável w (modelo Global do CPTEC) referente às 12 GMT, e iv) dados médios mensais de ozônio obtido pelo sensor OMI da NASA. Estes parâmetros atmosféricos foram reamostrados por interpolação bilinear para uma resolução espacial equivalente a resolução das imagens GOES 4x4 km ($\approx 0,04^\circ$). A área selecionada para o estudo foi a região NEB, limitada entre as latitudes de 0 a -20°S e as longitudes de -50°W a -34°W. Para a caracterização da nebulosidade foram utilizadas imagens de refletância do canal VIS do GOES fornecidas pela DSA/CPTEC/INPE.

Foi avaliado o desempenho do método na estimativa de irradiância (e irradiação) direta normal (no presente trabalho, correspondente a julho de 2007). Uma análise minuciosa foi realizada no intuito de remover dias com ausência de 1,5h de imagens no período diurno e apresentassem inconsistências nas curvas medidas de E_g , E_d e DNI. Selecionaram-se dias com condição de céu claro e parcialmente nublado para dois sítios experimentais. Foram elaborados ciclos diários de DNI medida e estimada por satélite e a diferença/desvio (satélite – medida). Gráficos ilustrando a variação temporal da irradiação direta normal diária (em MJ m⁻²) foram gerados. O grau de acurácia do método foi inferido através dos índices estatísticos usuais: R^2 , MBE e RMSE.

4. Resultados e Discussão

4.1. Ciclos diários de DNI

A Figura 3 descreve ciclos diários de DNI medida, estimada por satélite e a diferença entre eles ($DNI_{sat} - DNI$) em dias com condição predominante de céu claro para os sítios de Petrolina e Natal. Valores elevados de irradiação foram observados: $Q_N = 29,3 \text{ MJ m}^{-2}$ e $Q_{Nsat} = 28,9 \text{ MJ m}^{-2}$ em Petrolina e $Q_N = 30,6 \text{ MJ m}^{-2}$ e $Q_{Nsat} = 29,9 \text{ MJ m}^{-2}$ em Natal. Nota-se, nestes casos, que a estimativa por satélite subestimou a medida em cerca de $0,5 \text{ MJ m}^{-2}$. De modo geral, observa-se que a variação da DNI na ausência de nuvens é acompanhada adequadamente pela estimativa por satélite (vide linha vermelha). Ao longo da marcha diária, as diferenças situam-se entre: -270 e 250 W m^{-2} , -94 e 190 W m^{-2} para Petrolina e Natal, respectivamente. Contudo, os erros médios associados à estimativa foram de $-11,9 \text{ W m}^{-2}$ (Petrolina) e $1,29 \text{ W m}^{-2}$ (Natal).

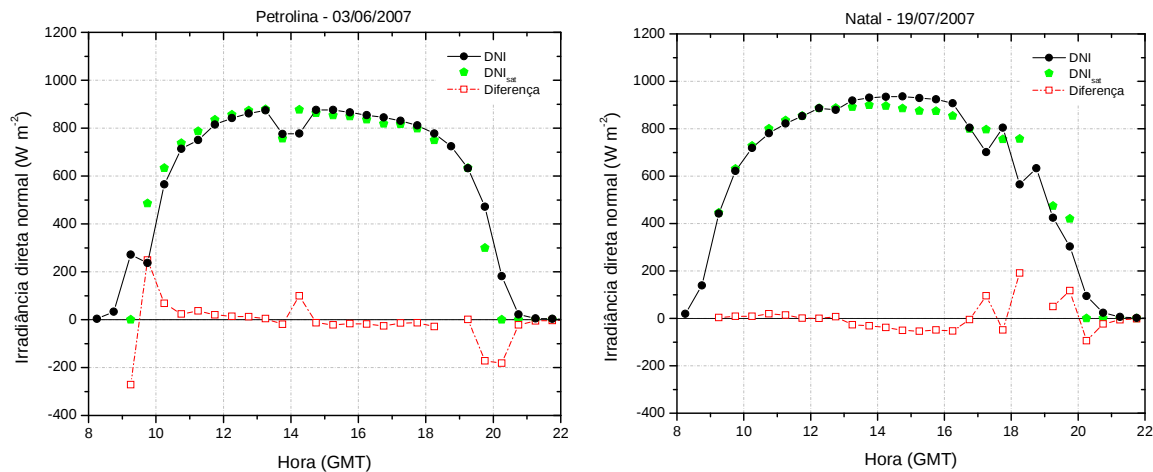


Figura 3. Ciclos diários de irradiância direta normal medida e estimada por satélite e diferença (estimado – medido) em condição de céu claro para os sítios experimentais de Petrolina e Natal.

Independentemente do sítio experimental, as curvas de DNI medida e estimada por satélite mostraram oscilações notáveis sob condição de céu parcialmente nublado (Figura 4). Nitidamente, a estimativa DNI_{sat} percebe a nebulosidade e segue as variações da medida, porém, por vezes subestima ou superestima. Em Petrolina, os erros na DNI estimada oscilaram entre -167 e 156 W m^{-2} ($5,7 \text{ W m}^{-2}$). No caso de Natal, os erros variaram entre -185 e 227 W m^{-2} ($-5,2 \text{ W m}^{-2}$). Valores entre parênteses representam os erros médios diários. De todo modo, tal como na Figura 3, a irradiação estimada por satélite mostrou resultados semelhantes às medições. A Q_N e Q_{Nsat} foram, respectivamente, de: $23,1$ e $23,2 \text{ MJ m}^{-2}$ (Petrolina), $21,9$ e $20,9 \text{ MJ m}^{-2}$ (Natal).

Com base nos resultados descritos nesta seção e estudos de sensibilidade do método podem ser enumeradas algumas fontes de erros: i) o desvio observado em condição de céu parcialmente nublado pode estar associado ao valor de R_{max} , de tal forma, que a refletância para cobertura total não seja isotrópica; ii) desvios negativos na estimativa do ciclo diurno, principalmente na condição de céu claro, podem ser provocados pelo valor de R_{min} adotado no pixel considerado, pois este parâmetro pode induzir a presença (falsa) de nuvens; ou seja, uma estimativa acurada da refletância da superfície faz-se necessário; iii) erros na calibração aplicada no canal VIS do GOES, e iv) o uso de dados médios mensais de β e apenas 1 valor diário de w (12 GMT) podem agregar erros a estimativa; esses parâmetros atmosféricos possuem alta variabilidade espaço-temporal. Todavia, os resultados obtidos evidenciam a boa estimativa deste método, o que encoraja o seu uso para gerar campos de irradiação.

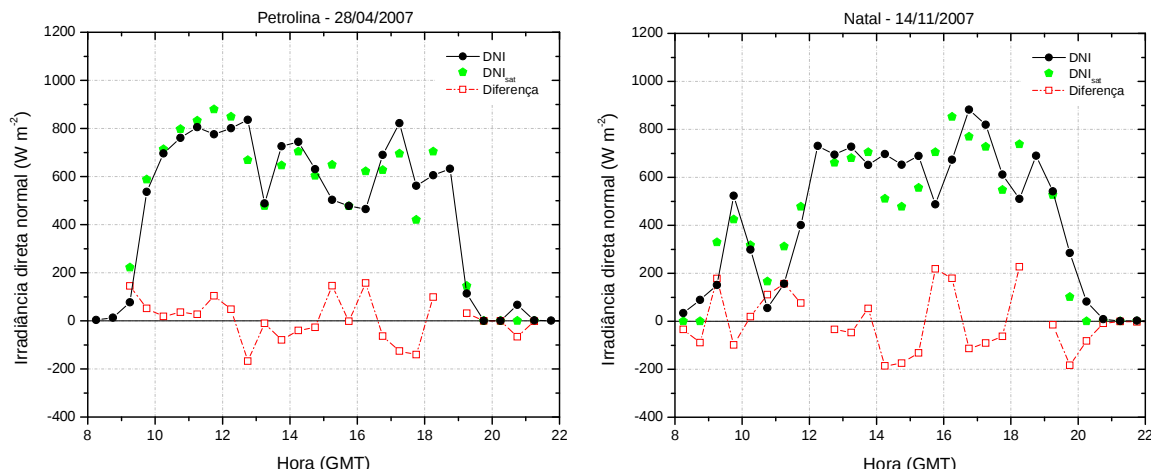


Figura 4. Ciclos diários de irradiância direta normal medida e estimada por satélite e diferença (estimado – medido) em condição de céu parcialmente nublado para os sítios experimentais de Petrolina e Natal.

4.2. Irradiação direta normal medida vs satélite

A Figura 5 apresenta a sequência temporal da Q_N medida e estimada por satélite em três sítios experimentais, durante o mês de julho de 2007. Percebe-se que as estimativas realizadas por satélite podem apresentar desvios de até $\pm 5 \text{ MJ m}^{-2}$ para valores diários, mas que na média mensal tende a apresentar desvios bem menores: $1,7 \text{ MJ m}^{-2}$ em Petrolina, $1,5 \text{ MJ m}^{-2}$ em Natal e São Luís. Observa-se, ainda, que: em dias com nebulosidade relativamente baixa ($Q_N \geq 25 \text{ MJ m}^{-2}$) os desvios diminuem consideravelmente, atingindo valores muito próximos ao nulo (isto, evidencia-se, a estimativa acurada de DNI_{cc} realizada pelo método). Por outro lado, nos dias com valores de $Q_N < 25 \text{ MJ m}^{-2}$, o que sugere nebulosidade parcial ou alta, os desvios resultam maiores. Este comportamento demonstra a necessidade de melhorias na avaliação da nebulosidade, ou seja, dos parâmetros R_{min} e R_{max} . Em termos gerais, é possível a existência de um ciclo anual e provavelmente local do parâmetro R_{max} influenciando sobre a estimativa da nebulosidade na Equação 2. Outras hipóteses plausíveis referentes às possíveis fontes de erros associadas ao método foram enumeradas na seção anterior, as mesmas podem estar contribuindo com a relativa dispersão encontrada aqui.

Como exemplo de aplicação do método, a Figura 6a ilustra a distribuição espacial de Q_N estimada por satélite para o dia 02 de Julho de 2007. A Figura 6b permite comparar a Q_N medida e estimada por satélite, para o mês de julho de 2007, nos sítios experimentais de Petrolina, Natal e São Luís. Pode-se notar considerável linearidade entre a Q_N medida e estimada; este comportamento foi ressaltado pelo elevado valor do R^2 ($= 0,97$). Observa-se que a estimativa de Q_N por satélite apresenta leve tendência a supestar a Q_N medida ($MBE = 1,6 \text{ MJ m}^{-2}$, o que corresponde a 8,9%). O valor de RMSE foi de $2,8 \text{ MJ m}^{-2}$ (o que corresponde a 15,9%). Deve-se ressaltar que a estatística apresentada não se refere a uma sequência temporal extensa. Esta análise está em andamento. De todo modo, estes resultados revelam-se consistentes e similares aos reportados por outros pesquisadores (Schilling et al. 2004; Martins et al. 2007; Viana et al. 2011).

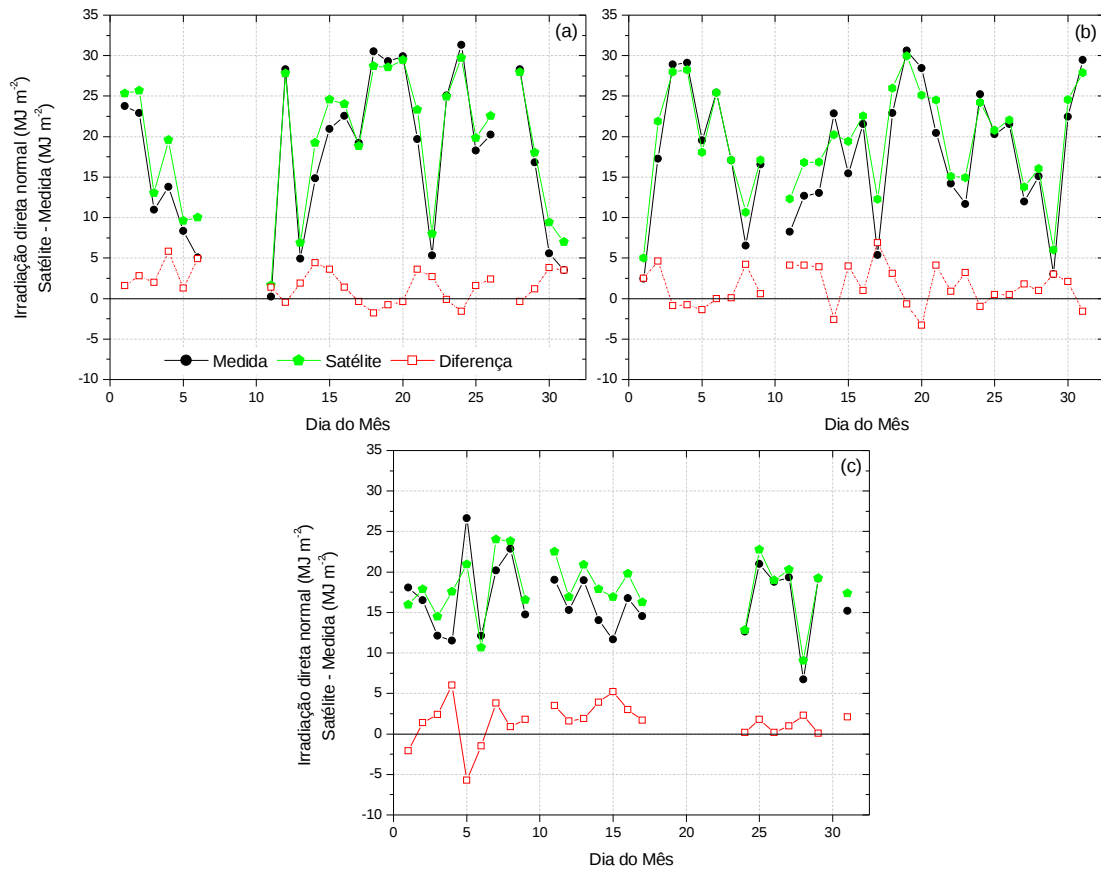


Figura 5. Variação da irradiação direta normal medida, estimada por satélite e diferença (satélite – medida) para três sítios experimentais: a) Petrolina, b) Natal e c) São Luís. Mês de análise julho de 2007.

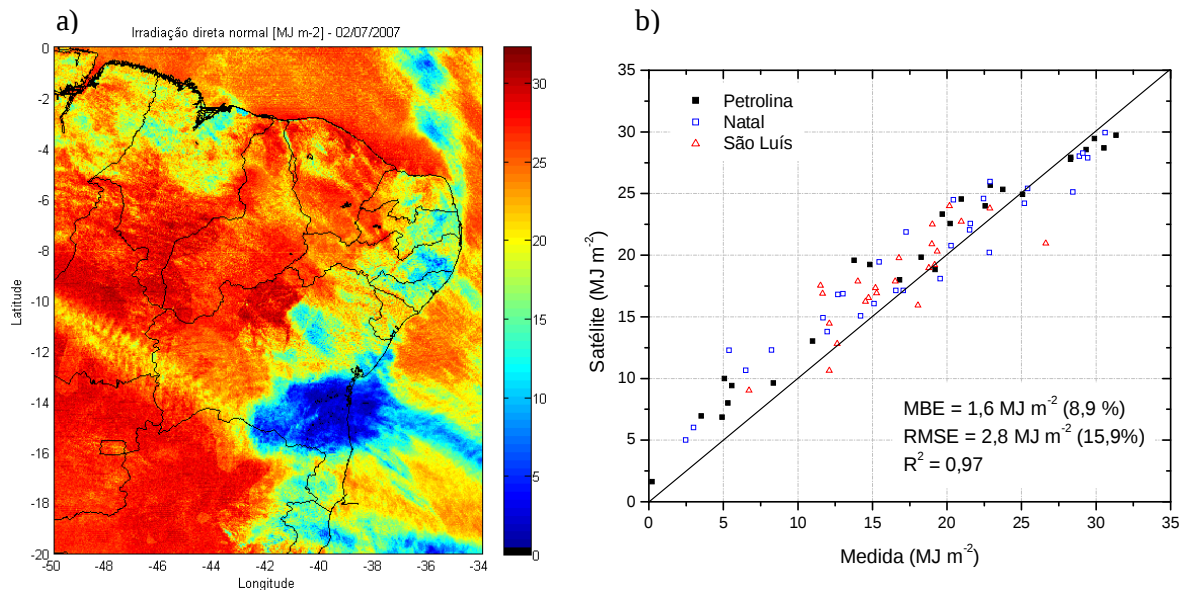


Figura 6. a) Distribuição espacial de irradiação direta normal estimada via satélite para a região Nordeste do Brasil no dia 02/07/2007. b) Comparação entre a irradiação direta normal medida e estimada por satélite para três sítios experimentais no Nordeste do Brasil. Mês de análise julho de 2007. MBE e RMSE em percentual são obtidos do valor médio observado de Q_N ($= 17,4 \text{ MJ m}^{-2}$).

5. Conclusões

Este trabalho apresentou um método alternativo de estimativa de irradiância direta normal (DNI) e irradiação (Q_N) à superfície sob todas as condições de nebulosidade. Uma primeira validação do algoritmo foi realizada para três sítios experimentais (Petrolina, Natal e São Luís) no Nordeste brasileiro. Os resultados evidenciam que o método representa satisfatoriamente o ciclo diário de DNI medida, tanto em dias claros como em dias parcialmente nublados, com erros médios diários inferiores a $\pm 12 \text{ W m}^{-2}$. A estimativa de Q_N por satélite mostra boa concordância em relação à verdade terrestre, sendo ratificada pelo alto valor do coeficiente de determinação $R^2 = 0,97$. Os valores médios de MBE (8,9%) e RMSE (15,9%) obtidos pelo algoritmo são similares e em alguns casos inferiores a modelos difundidos na literatura, o que credencia seu uso para aplicações de energia solar. Embora os resultados obtidos sejam representativos, esses erros podem ser dirimidos com uma avaliação mais detalhada de parâmetros atmosféricos e de nebulosidade adotados pelo algoritmo. Ainda, validações com séries de dados mais extensas e de outros locais estão sendo elaboradas e podem fornecer informações mais conclusivas e abrangentes sobre a acurácia do método aqui apresentado.

Agradecimentos. À rede SONDA, à DSA/CPTEC/INPE, à PGMET/CPTEC/INPE, e à CAPES/MEC, que forneceram dados e deram apoio na participação no XVI SBSR. O trabalho encontra-se no marco conceitual do projeto CAPES Pró-Engenharias nº 871/2008 “Sistema de informação geográfica (SIG) para localização de centrais termoeletricas solares de grande porte (100 MWe) no semi-árido nordestino”.

Referências Bibliográficas

- Alam, S. Prediction of direct and global solar irradiance using broadband models: Validation of REST model. **Renewable Energy**, v. 31, p. 1253-1263, 2006.
- Ceballos, J.C.; Rodrigues, M.L. Estimativa de insolação mediante satélite geoestacionário: resultados preliminares. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET), 15., São Paulo. **Anais...** 2008. CD-ROM. (INPE-15501-PRE/10229).
- Ceballos, J.C.; Bottino, M.J.; Souza, J.M. A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. **J. Geophys. Res.** v. 109, D02211, doi:10.1029/2003JD003531, 2004.
- Gueymard, C.A. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: Detailed theoretical performance assessment. **Solar Energy**, v. 74, p. 355–379, 2003a.
- Gueymard, C. A. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part II: validation with high quality measurements. **Solar Energy**, v. 74, p. 381–395, 2003b.
- INTERNACIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Technology roadmap - concentrating solar power.** Paris: OECD/IEA, 2010.
- Ineichen, P.; Perez, R.; Kmiecik, M.; Renne, D. Modeling direct irradiance from GOES visible channel using generalized cloud indices. In: Proceeding of AMS Annual Meeting, 80., Long Beach, CA. **Proceedings...** 2000. p. 133–136.
- Madkour, M. A.; El-Metwally, M.; Hamed, A. B. Comparative study on different models for estimation of direct normal irradiance (DNI) over Egypt atmosphere. **Renewable Energy**, v. 31, p. 361-382, 2006.
- Martins, F. R.; Pereira, E. B.; Abreu, S. L. Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA project. **Solar Energy**, v. 81, p. 517–528, 2007.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Plano Nacional de Energia 2030.** Brasília: MME, EPE, 2007. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: 2.abr.2011.
- Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Abreu, S. L.; Ruther, R. **Atlas brasileiro de energia solar.** INPE, 1. ed. São José dos Campos, p. 66, 2006.
- Perez, R.; Ineichen, P.; Moore, K.; Kmiecik, M.; Chain, C.; George, R.; Vignola, F. A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation. **Solar Energy**, v. 73, p. 307–317, 2002.
- Sargent e Lundy. **Assessment of parabolic and power tower solar technology Cost and Performance Forecasts.** Chicago: National Renewable Energy Laboratory, 2003. SL-5641.
- Schillings, C.; Mannstein, H.; Meyer, R. Operational method for deriving high resolution direct normal irradiance from satellite data. **Solar Energy**, v. 76, p. 475–484, 2004a.
- Schillings, C.; Meyer, R.; Mannstein, H. Validation of a method for deriving high resolution direct normal irradiance from satellite data and application for the Arabian Peninsula. **Solar Energy**, v. 76, p. 485–497, 2004b.

Tiba, C. **Atlas solarimétrico do Brasil** – banco de dados terrestres. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000.

Viana, T. S.; Ruther, R.; Martins, F. R.; Pereira, E. B. Assessing the potential of concentrating solar photovoltaic generation in Brazil with satellite-derived direct normal irradiation. **Solar Energy**, v. 85, p. 486-495, 2011.

Vignola, F.; Harlan, P.; Perez, R.; Kmiecik, M. Analysis of satellite derived beam and global solar radiation data. **Solar Energy**, v. 81, p. 768-772, 2007.