

OBTENÇÃO DE REGIMES DE IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL SOBRE O NORDESTE DO BRASIL A PARTIR DE DADOS DO MODELO SATELITAL GL VERSÃO 1.2

Anthony Carlos Silva Porfirio – anthonycsp@gmail.com

Juan Carlos Ceballos – jcc.1943@gmail.com

Simone Marilene Sievert da Costa Coelho – smsievert@gmail.com

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC),
Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA)

***Resumo.** Estudos prévios destacam que o Nordeste do Brasil (NEB) apresenta características climáticas favoráveis para o aproveitamento do recurso solar. Entretanto, são escassos os estudos que investigam regiões com padrões típicos e sua variabilidade espaço-temporal, sobretudo usando dados de satélites. O presente trabalho teve por objetivo descrever os diferentes ciclos anuais de irradiação solar global e de transmitância atmosférica global (Kt) sobre o NEB utilizando-se de dados provenientes do modelo satelital GL1.2. Este modelo roda em modo operacional no CPTEC/INPE e alguns de seus dados são disponibilizados na página web <http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/>. Os dados GL possuem vantagens evidentes em relação aos dados de uma rede de estações: maior e mais detalhada cobertura espacial e séries temporais mais completas. A qualidade do modelo satelital é ilustrada mostrando resultados de comparações com a "verdade terrestre" (rede INMET) para o ano 2016. Para identificar regimes anuais característicos, um método de agrupamento similar ao k-means foi adotado, utilizando um conjunto expressivo de pixels selecionados sobre a América do Sul e seu ciclo anual médio (valores mensais) para 2001-2015. Identificaram-se 21 grupos, sendo que sobre a região que inclui o NEB 11 diferentes regimes foram presenciados (7 continentais, e 4 oceânicos com alguma área continental semelhante). É apresentada a distribuição geográfica desses regimes, bem como a representação dos ciclos anuais de irradiação global e Kt. Os resultados evidenciam que os ciclos anuais variam significativamente entre as diferentes zonas climáticas. A abordagem proposta, baseando-se nos dados GL, permite melhor reproduzir as variações espaciais nas regiões de transição entre distintos regimes, com baixo custo computacional e com acurácia satisfatória.*

Palavras-chave: Radiação Solar, Nordeste do Brasil, Satélite GOES

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre os níveis de irradiação solar global à superfície (G) para um determinado local ou região é de notória importância para o desenvolvimento de estudos relacionados à energia, ambiente, clima, agricultura, dentre outros. Nas duas últimas décadas verificou-se uma tendência de ampliação do número de estações automáticas no Brasil (ver, por exemplo, <http://www.inmet.gov.br/portal/> e <http://sonda.cst.inpe.br/>); todavia, as redes de monitoramento ainda não apresentam densidade suficiente para produzir informações precisas sobre a variabilidade espacial de G. Além disso, são escassas as estações com longas e homogêneas séries temporais de dados (Rodrigues, 2019). Como alternativa para estimar G, as duas principais abordagens atuais são: a) modelagem numérica (Lara-Fanego *et al.* 2012; Bojanowski *et al.* 2014), e b) modelos baseados na informação de satélites (Yang *et al.* 2008; Ma e Pinker, 2012). Ambas metodologias apresentam potencialidades e deficiências (Pinker *et al.* 1995; Ruiz-Arias *et al.* 2016). Por exemplo, as duas abordagens permitem estimativas com longas séries de dados sobre regiões geográficas extensas, mas diferem na resolução espacial (satélites, escala de pixel $\leq 0,04^\circ$; modelos, escala de grade $\geq 0,25^\circ$).

Os primeiros trabalhos utilizando-se de imagens de satélites geoestacionários para o cômputo de G datam das décadas de 1970 e 1980 (Tarpley, 1979; Gautier *et al.* 1980; Cano *et al.* 1986; Dedieu *et al.* 1987). Nas décadas de 1990 e 2000 registram-se modelos com aperfeiçoamentos e/ou maior complexidade, como os publicados por Stuhlmann *et al.* (1990), Pinker e Laszlo (1992), Mueller *et al.* (2004) e Rigollier *et al.* (2004). Alguns destes modelos têm sido empregados para gerar produtos de estimativa de G para diferentes partes do mundo; uma lista detalhada de produtos disponíveis encontra-se em Vernay *et al.* 2014. De fato, imagens de satélites são uma ferramenta relevante (e de baixo custo) para subsidiar o monitoramento do recurso solar.

No Brasil, dois modelos físicos baseados na informação de satélites geoestacionários são atualmente empregados para avaliar distribuições espaciais de irradiação solar. Por um lado, o modelo denominado Brasil-SR, versão modificada do modelo IGMK desenvolvido na Alemanha (Stuhlmann *et al.* 1990), com aplicações ao Brasil com imagens Meteosat e GOES (Pereira *et al.* 1996; Pereira *et al.* 2000). O Atlas Brasileiro de Energia Solar foi elaborado baseando-se no modelo Brasil-SR (Pereira *et al.* 2017). Por outro lado, o modelo GL (de radiação Global) teve origem nacional, com primeira versão desenvolvida na UFPB (Universidade Federal da Paraíba) aplicada ao Nordeste do Brasil

utilizando imagens do canal visível (VIS) do Meteosat (Ceballos e Moura, 1997). Posteriormente, uma versão aprimorada do modelo (denominada de GL1.2) foi implementada no CPTEC/INPE utilizando-se de imagens VIS do GOES e realiza o monitoramento operacional da irradiação solar à superfície (global e espectro ultravioleta+visível) sobre a América do Sul. Detalhes sobre os fundamentos físicos do modelo são reportados por Ceballos *et al.* (2004). Uma vantagem do GL é sua total independência de dados de radiação à superfície, fazendo uso destes apenas para validação.

A base de dados do produto GL1.2 dispõe de uma série temporal longa (desde 1998 até o presente) e boa resolução espacial ($0,04^\circ$ ou seja 4 km no nadir do satélite), características atraentes para uma série de estudos. De fato, ao longo dos anos o modelo GL tem demonstrado ser uma ferramenta robusta e com grande potencial de contribuição para estudos em diferentes contextos, como na validação de modelos numéricos e sistemas de assimilação de dados (Tarasova *et al.* 2006; Gonçalves *et al.* 2009), na modelagem agrometeorológica e hidrológica (Pinto *et al.* 2010; Hissa e Soares-Filho, 2014), na caracterização do recurso solar regional (Ortega *et al.* 2010). Os campos diários (formato PNG), os arquivos médios mensais de irradiação solar (formato GeoTIFF) e as séries históricas transformadas em pântadas com resolução $0,4^\circ$ (formato binário) são disponibilizados no site <http://satellite.cptec.inpe.br/radiacao/>. Resultados da validação do modelo GL1.2 com medidas da rede automática do INMET evidenciam a boa qualidade das estimativas sobre o Brasil (Porfírio, 2017), o que sugere seu emprego para descrever regimes de irradiação solar.

A maioria dos trabalhos publicados descreve os regimes de irradiação solar global apenas através de campos espaciais de valores médios mensais e anuais, permitindo a detecção de regiões com máximos/mínimos valores de potencial solar. Embora valiosos, estes trabalhos não preenchem totalmente a lacuna de conhecimento sobre o conjunto de padrões típicos, especialmente em termos de variabilidade espaço-temporal. O presente trabalho caracteriza, de forma resumida e preliminar, os regimes anuais médios de irradiação solar global sobre o Nordeste do Brasil, período 2001-2015. Utiliza a base de dados mensais GL1.2 com alta resolução espacial (4 km). Uma técnica convencional de análise de agrupamento foi utilizada para determinar as regiões homogêneas de irradiação solar com base na similaridade do ciclo anual. Além disso, algumas características sobre o ciclo anual da transmitância atmosférica para estas regiões são também apresentadas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A comparação das médias mensais obtidas permite avaliar o grau de dispersão de pares [G(medida) GL(modelo)] e abonar (ou não) a adoção do modelo GL para análise estatística da radiação solar. Para fins de comparação do modelo GL1.2 com dados de "verdade terrestre" foram utilizadas medições da rede de estações automáticas do INMET para os Estados do Nordeste brasileiro (130 estações), para o ano de 2016. Os dados são horários e foram integrados para obter valores diários. Para análise de relação entre GL e G foram considerados pares [G GL] diários cumprindo as condições seguintes:

1) Valores de G e GL situados no intervalo [30 400]. Estes são limites físicos esperáveis para a irradiância média diária;

2) Diferença $\delta G = |GL - G| < 75 \text{ W m}^{-2}$. Este valor corresponde a 3 desvios padrões de δG , observados para o Brasil (Porfírio, 2017);

3) Número $Nd \geq 15$ de pares "válidos" [G GL] no mês considerado, utilizados para estimar média mensal de G e de GL. Valores $Nd < 15$ sugerem certa instabilidade de funcionamento do sítio considerado e desvios δG com média provavelmente maior.

Medidas da qualidade do ajuste para um conjunto de N pares [G GL] foram o viés (MBE, *Mean Bias Error*) e o desvio padrão amostral (STD) do desvio $\delta G = (GL - G)$:

$$MBE = (1/N) \sum_n (GL_n - G_n) = \langle \delta G \rangle \quad (1)$$

$$STD = \left[(1/N) \sum_n (\delta G_n - MBE)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

Para definição de regimes foram utilizados arquivos de médias mensais de radiação solar (irradiância média diária em W m^{-2}) para América do Sul, período 2001-2015 ($15 \times 12 = 180$ arquivos). Cada arquivo mensal inclui dados binários preenchendo uma matriz de 1800×1800 pixels em grade geográfica regular com resolução 0.04° . Foi escolhida uma região de análise \mathbf{R} definida pelos intervalos [$83^\circ 33,75^\circ \text{W}$] em longitude e [$44^\circ \text{S } 12,5^\circ \text{N}$] em latitude, para a qual a série GL apresenta continuidade temporal ao longo dos 15 anos.

Para procurar ciclos anuais característicos, foi utilizada análise de agrupamentos aplicada a um conjunto de N pixels amostrados em \mathbf{R} (um em cada quatro colunas e quatro linhas), definindo uma população de [$NL = 353$ linhas, $NC = 308$ colunas, $Nt = 12$ meses médios] ou seja $N = NL \times NC$ vetores com dimensão Nt . Foi adotada a distância euclidiana entre dois vetores (pixels) como critério de semelhança:

$$D_{ij}^2 = \sum_{t=1,12} [GL(i,t) - GL(j,t)]^2 \quad (3)$$

Os pixels foram agrupados de acordo com a mínima distância euclidiana a um conjunto de C centróides com dimensão 12: $C(NG = 21, Nt = 12)$, ou seja, "simple linkage" (SL) supervisionado (Johnson e Wichern, 2007). O conjunto C de referência foi determinado por agrupamento dinâmico a partir de um conjunto inicial C_0 definido arbitrariamente (neste trabalho, $NG1 = 16$ pixels distribuídos homogeneamente em R , e $NG2 = 5$ com suas 12 componente iguais, distribuídas no intervalo [100 300]). A classificação SL dos N pixels permite definir NG grupos e um novo conjunto $C1$ de centróides. A iteração do procedimento permite a convergência de conjuntos $C_0, C1, C2, \dots \rightarrow C$. Foram aplicadas 15 iterações a partir de C_0 . Este esquema de agrupamento dinâmico é semelhante ao "k-means" descrito em Johnson e Wichern (2007). O método SL aplicado aos arquivos mensais do NEB (em alta resolução) permitiu identificar os ciclos característicos presentes na região e sua distribuição geográfica.

Foi avaliado o ciclo anual da transmitância atmosférica global (ou índice de claridade) $K_t = GL/Go$ correspondente aos regimes encontrados, onde Go é a irradiância solar média no topo da atmosfera (Iqbal, 1983). No que segue, as grandezas G e GL são expressas em $W m^{-2}$ (irradiância média diária) ou $MJ m^{-2}$ (irradiação). Fator de conversão: $1 W m^{-2} \rightarrow 86400/1E6 = 0,0864 MJ m^{-2}$.

3. RESULTADOS

A Fig. 1 ilustra a comparação entre valores mensais G (medidos) e GL (modelo) no NEB para o ano de 2016. A linha preta representa a relação 1:1 acrescido do erro médio (viés), enquanto que as linhas magentas representam a $1:1 \pm$ dois desvios padrões (STD) da média do viés. As estimativas GL apresentam claramente uma boa linearidade com as medições de superfície e baixa dispersão (maior parte dos pontos dentro de ± 2 STD). As métricas estatísticas revelam uma boa acurácia e leve tendência de superestimativa do modelo: $MBE = 7,4 W m^{-2}$ ($0,64 MJ m^{-2}$) e $STD = 16,6 W m^{-2}$ ($1,43 MJ m^{-2}$).

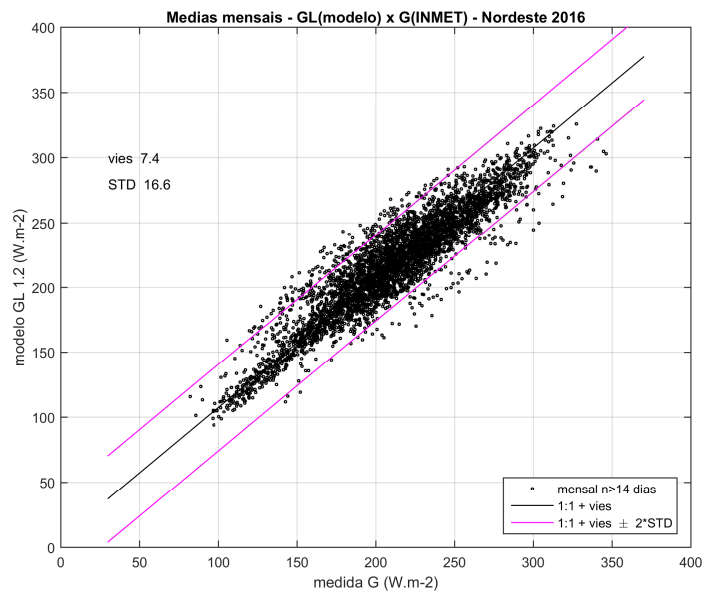


Figura 1 - Comparação de valores mensais de irradiância média medidos (estações INMET) e estimados pelo modelo GL1.2 para o NEB, ano 2016.

A Fig. 2 mostra a distribuição espacial da irradiação solar global média via GL1.2 (período 2001-2015), incluindo a posição das estações automáticas INMET utilizadas. Evidencia-se uma variação espacial significativa sobre o continente, com mínimos ($< 19 MJ m^{-2}$) ocorrendo na faixa leste do NEB e máximos em áreas do semi-árido ($\approx 23 MJ m^{-2}$). No oceano observam-se altos valores de irradiação global, com pico em torno de $4,5^{\circ}S$ e $36,5^{\circ}W$. Nota-se também que o MBE mensal (Eq. 1) é o mesmo que o valor esperável para o MBE anual, e da ordem de cada unidade na escala de cores. Portanto, esta escala delimita valores de $\langle GL \rangle \approx \langle G \rangle$ dentro da margem de erro médio esperável. A distribuição razoavelmente homogênea das estações e a magnitude do erro médio reportado pelo GL justifica o uso deste para descrever padrões médios de irradiação em alta definição. Por outro lado, a extensão e continuidade temporal do produto GL permite a análise em escala temporal maior que a rede de superfície (no caso, escala de 15 anos).

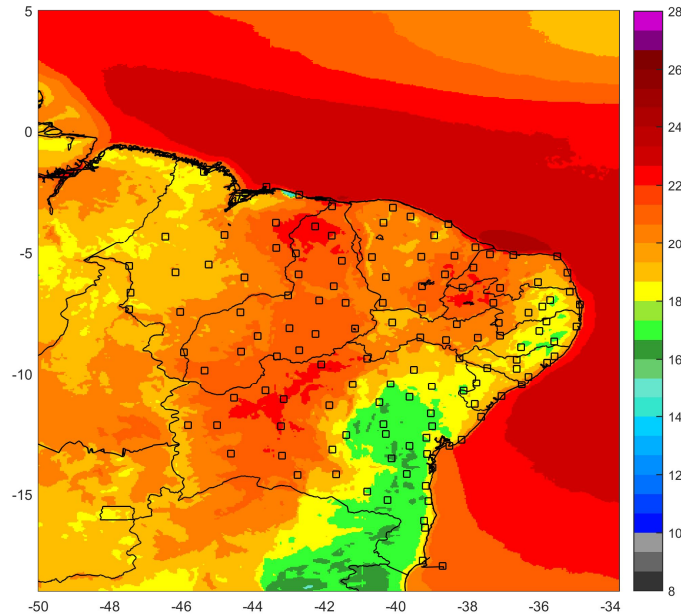


Figura 2 - Distribuição espacial da irradiação global média no NEB via modelo GL1.2, período 2001-2015, incluindo a posição das estações INMET utilizadas na validação.

A Fig. 3 ilustra a distribuição geográfica dos regimes de acordo com 21 tipos de ciclo anual. Os ciclos foram encontrados para a área efetiva do produto GL1.2. Em termos gerais, fica claramente delimitada uma grande área central amazônica (grupos 9, 10 e 15), rodeada por uma transição (11 e 19) associada ao Cerrado e Semi-árido. Este núcleo é separado pelo grupo 13: a Leste, uma estreita faixa litorânea com regime 7, e ao Sul por regimes 4 e 7. No Atlântico ao sul do continente, os grupos 1, 4, 6 e 7 apresentam ciclos com regime oceânico que se reflete no interior do continente ao sul do regime 13; o regime 12 (leste do continente) é predominantemente do tipo oceânico, embora seja observado em uma área limitada no interior do NEB. No Atlântico ao norte do continente, o grupo 16 avança sobre o continente no Piauí. O grupo amazônico 15 se expande parcialmente no oceano. Como esperado, existe uma transição brusca entre regimes oceânico e continental (ou seja do padrão de nebulosidade) ao longo do litoral. É importante notar que o número de grupos adotado neste trabalho (= 21) foi escolhido de modo a exceder a quantidade fundamental de "climas" da radiação solar na América do Sul. Assim, alguns grupos observados podem representar apenas sub-classes de um regime mais geral.

A distribuição espacial dos regimes com foco no NEB é apresentada na Fig. 4. Observam-se 11 diferentes regimes com extensões variáveis dentro da região compreendida entre as latitudes 20°S e 5°N e longitudes 50° e 34°W. Analisando as Figs. 3 e 4, verifica-se que esses regimes podem ocorrer sobre o oceano e/ou continente, bem como a alta resolução dos dados GL possibilita um melhor detalhamento das variações espaciais entre regimes. A posição geográfica dos regimes parece capturar bem as características climáticas da região. Por exemplo, as características litorâneas parecem ser reproduzidas pelos grupos 6, 7, 8 e 13; cerrado e semi-árido pelas classes 11, 12, 15 e 19; e amazônico sobretudo pelo grupo 10.

Os ciclos anuais de irradiação solar global e Kt associados a cada um dos 11 regimes são ilustrados na Fig. 5. Para melhor visualização, estes regimes foram agrupados em 3 categorias: oceano Atlântico Equatorial, oceano Atlântico Tropical e continental. De modo geral, os ciclos anuais de irradiação apresentam oscilações sazonais significativas, causado pelo efeito combinado das variações de nebulosidade e da disponibilidade de irradiação solar no topo da atmosfera. Em contrapartida, alguns ciclos anuais de Kt (6, 7, 12 e 13) exibem pouca variação ao longo do ano. Sobre o oceano, os grupos 12 e 16 destacam-se pela larga extensão e por exibirem as máximas médias anuais de irradiação global, 22,4 e 22,9 MJ m⁻², e de Kt, 0,64, respectivamente. Esses regimes são influenciados pela variação anual da intensidade e posicionamento da Zona de Convergência Intertropical e da Alta do Atlântico Sul. O grupo 7, representativo da faixa litorânea, exibe valores máximos (mínimos) de irradiação e Kt nos meses de verão (inverno). As médias anuais foram de 19,7 MJ m⁻² para a irradiação e 0,56 para o Kt. Na região continental, os grupos 19, 15 e 11 apresentam os máximos valores de irradiação no mês de setembro, enquanto que diferem no mês de ocorrência do mínimo (19, junho; 15, fevereiro; 11, dezembro). Para esses grupos, os valores médios anuais de irradiação foram de 19,7, 20,1 e 20,6 MJ m⁻², respectivamente. Por fim, os níveis médios anuais de Kt foram bem similares: 0,58 (regime 19), 0,57 (regime 15) e 0,60 (regime 11).

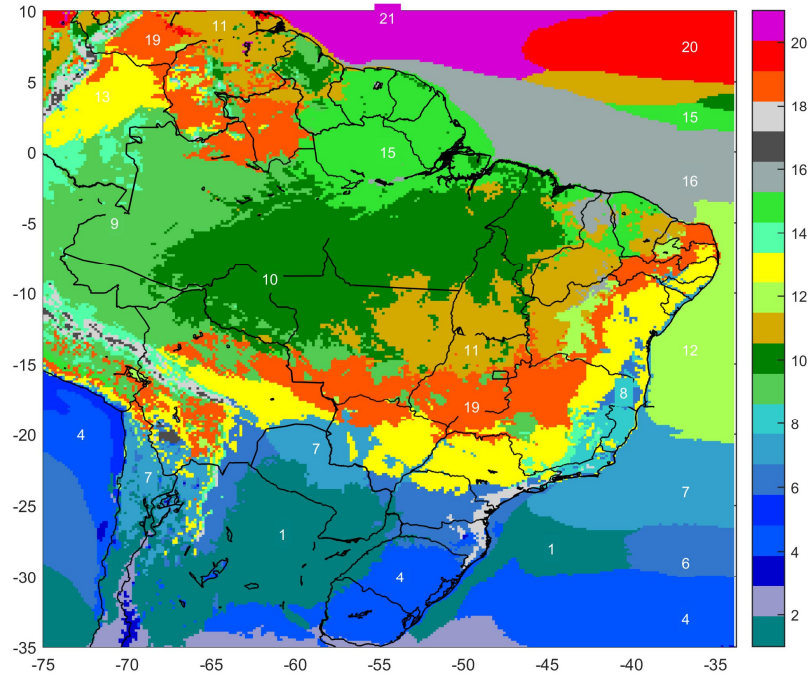


Figura 3 - Distribuição geográfica dos regimes de acordo com o ciclo anual de irradiação solar global no Brasil, período 2001-2015.

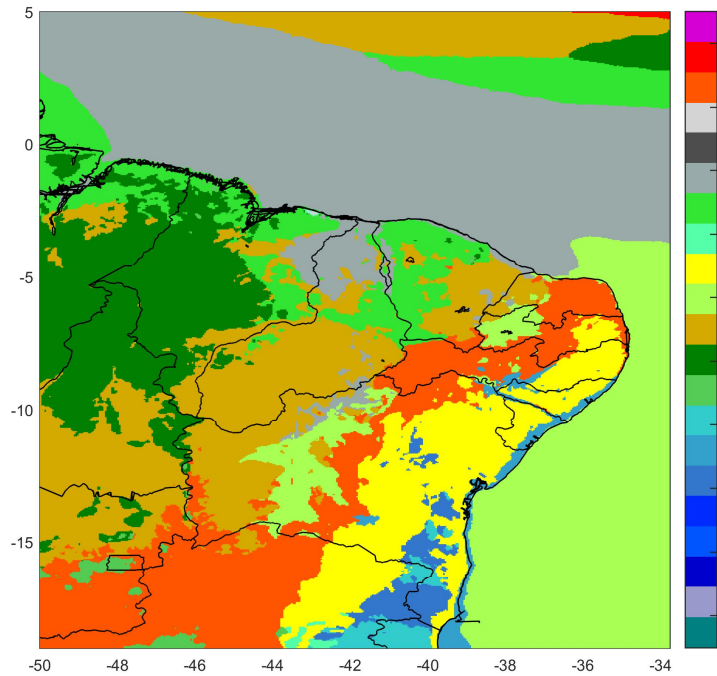


Figura 4 - Distribuição geográfica dos regimes de acordo com o ciclo anual de irradiação solar global no NEB, período 2001-2015.

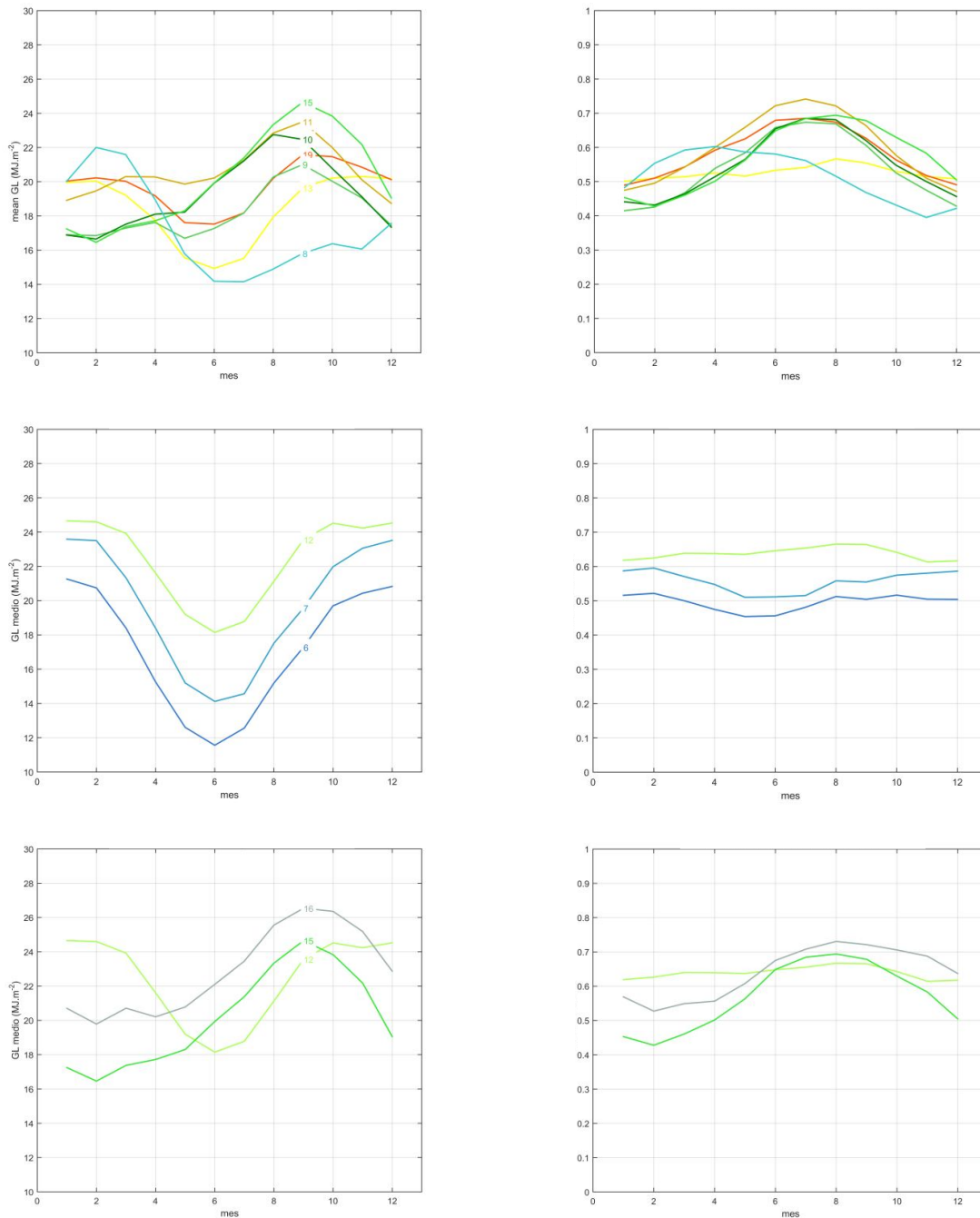


Figura 5 - Ciclos anuais de irradiação solar global (esquerda) e Kt (direita) para os regimes presentes no NEB. Posição de ocorrência predominante dos regimes: continente (painel superior), oceano Atlântico Tropical (painel do meio) e oceano Atlântico Equatorial (painel inferior).

4. CONCLUSÕES

Resultados preliminares do uso de dados do modelo satelital GL1.2 (período 2001-2015) para descrever os diferentes ciclos anuais de irradiação solar global e de transmitância atmosférica global (Kt) sobre o Nordeste do Brasil (NEB) são apresentados. Comparações entre as estimativas GL com medidas de superfície (obtidas nas estações da rede INMET), comprovam a boa qualidade do modelo, com MBE de $0,64 \text{ MJ m}^{-2}$ e desvio padrão de $1,43 \text{ MJ m}^{-2}$ na base mensal. Os regimes anuais característicos (21 regiões homogêneas) foram determinados utilizando um método de agrupamento similar ao *k-means* e um conjunto robusto de pixels selecionados sobre a América do Sul. 11 distintos regimes de ciclos anuais de irradiação global foram identificados sobre o NEB, sendo 7 sobre o continente e 4 sobre o oceano. A abordagem proposta reproduz de forma eficiente os padrões climáticos da região, bem como descreve

detalhadamente as variações nas regiões de transição entre diferentes áreas homogêneas. Embora os resultados obtidos sejam representativos, uma avaliação mais refinada faz-se necessária sobretudo para definir o número apropriado de regimes.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao INMET, à PGMET/INPE e ao PNP/DACTA (processo 317517/2019-01) pelo suporte financeiro ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS

- Bojanowski, J. S., Vrieling, A., Skidmore, A. K., 2014. A comparison of data sources for creating a long-term time series of daily gridded solar radiation for Europe, *Solar Energy*, vol. 99, pp. 152-171.
- Cano, D., Monget, J. M., Aubuisson, M., Guillard, H., Regas, N., Wald, L., 1986. A method for the determination of global solar radiation from meteorological satellite data, *Solar Energy*, vol. 37, pp. 31-39.
- Ceballos, J. C., Moura, G. B., 1997. Solar Radiation Assessment Using Meteosat 4-VIS Imagery, *Solar Energy*, vol. 60, pp. 209-219.
- Ceballos, J. C., Bottino, M. J., Souza, J. M., 2004. A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery, *J. Geophys. Res.*, vol. 109, D02211.
- Dedieu, G., Deschamps, P. Y., Kerr, Y. H., 1987. Satellite Estimation of Solar Irradiance at the Surface of the Earth and of Surface Albedo Using a Physical Model Applied to Meteosat Data, *J. Climate Appl. Meteor.*, vol. 26, pp. 79-87.
- Gautier, C., Diak, G., Masse, S., 1980. A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data, *J. Appl. Meteorol.*, vol. 19, pp. 1005-1012.
- Gonçalves, L. G. G., Shuttleworth, W. J., Vila, D., Larroza, E., Bottino, M. J., Herdies, D. L., Aravequia, J. A., Mattos, J. G. Z., Toll, D. L., Rodell, M., Houser, P., 2009. The South American Land Data Assimilation System (SALDAS) 5-Yr Retrospective Atmospheric Forcing Datasets, *J. Hydrometeorol.*, vol. 10, pp. 999-1010.
- Hissa, L. B. V., Soares-Filho, B. S. S., 2014. A Combined Biophysical and Economic GIS Framework to Assess Sugarcane Cropping Potential in Brazil, *Transactions in GIS*, vol. 18, n. 3, pp. 449-463.
- Iqbal, M., 1983. *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press, New York.
- Johnson, R. A., Wichern, D. W., 2007. *Applied Multivariate Statistical Analysis*, Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- Lara-Fanego, V., Ruiz-Arias, J. A., Pozo-Vázquez, D., Santos-Alamillos, F. J., Tovar-Pescador, J., 2012. Evaluation of the WRF model solar irradiance forecasts in Andalusia (southern Spain), *Solar Energy*, vol. 86, pp. 2200-2217.
- Ma, Y., Pinker, R. T., 2012. Modeling shortwave radiative fluxes from satellites, *J. Geophys. Res.*, vol. 117, D23202.
- Mueller, R. W., Dagestad, K. F., Ineichen, P., Schroedter-Homscheidt, M., Cros, S., Dumortier, D., Kuhlemann R., Olseth, J. A., Piernavieja, G., Reise, C., Wald, L., Heinemann, D., 2004. Rethinking satellite-based solar irradiance modelling – the solis clear-sky module, *Remote Sens. Environ.*, vol. 91, pp. 160-174.
- Ortega, A., Escobar, R., Colle, S., Abreu, S. L., 2010. The state of solar energy resource assessment in Chile, *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 2514-2524.
- Pereira, E. B., Abreu, S. L., Stuhlmann, R., Rieland, M., Colle, S., 1996. Survey of the incident solar radiation in Brazil by use of Meteosat satellite data, *Solar Energy*, vol. 57, n. 2, pp. 125-132.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Abreu, S. L., Couto, P., Stuhlmann, R., Colle, S., 2000. Effects of burning of Biomass on satellite estimations of solar irradiation in Brazil, *Solar Energy*, vol. 68, pp. 91-107.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Lima, F. J. L., Ruther, R., Abreu, S. L., Tiepolo, G. M., Pereira, S. V., Souza, J. G., 2017. *Atlas brasileiro de energia solar*, 2. ed., INPE, São José dos Campos.
- Pinker, R. T., Laszlo, I., 1992. Modeling surface solar irradiance for satellite applications on a global scale, *J. Appl. Meteorol.*, vol. 31, pp. 194-211.
- Pinker, R. T., Frouin, R., Li, Z., 1995. A review of satellite methods to derive surface shortwave irradiance, *Remote Sens. Environ.*, vol. 51, pp. 108-124.
- Pinto, L. I. C., Costa, M. H., Diniz, L. M. F., Sediya, G. C., Pruski, F. F., 2010. Comparação de produtos de radiação solar incidente à superfície para a América do Sul, *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 25, n. 4, pp. 469-478.
- Porfírio, A. C. S., 2017. *Uma contribuição à modelagem de aerossol e componentes da radiação solar no modelo GL*, Tese de Doutorado, INPE, São José dos Campos.
- Rigollier, C., Lefevre, M., Wald, L., 2004. The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images, *Solar Energy*, vol. 77, pp. 159-169.
- Rodrigues, A. D., 2019. *Tendência e homogeneidade da série histórica da radiação solar inferida por satélite via modelo GL1.2/CPTEC-INPE*, Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos.
- Ruiz-Arias, J. A., Arbizu-Barrena, C., Santos-Alamillos, F. J., Tovar-Pescador, J., Pozo-Vázquez, D., 2016. Assessing the Surface Solar Radiation Budget in the WRF Model: A Spatiotemporal Analysis of the Bias and Its Causes, *Monthly Weather Review*, vol. 144, pp. 703-711.
- Stuhlmann, R., Rieland, M., Raschke, E., 1990. An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data, *J. Appl. Meteorol.*, vol. 29, pp. 586-603.

- Tarasova, T. A., Fernandez, J. P. R., Pisnichenko, I. A., Marengo, J. A., Ceballos, J. C., Bottino, M. J., 2006. Impact of New Solar Radiation Parameterization in the Eta Model on the Simulation of Summer Climate over South America, *J. Appl. Meteorol. Clim.*, vol. 45, pp. 318-333.
- Tarpley, J. D., 1979. Estimating incident solar radiation at the Earth's surface from geostationary satellite data, *J. Appl. Meteorol.*, vol. 18, pp. 1172-1181.
- Vernay, C., Pitaval, S., Blanc, P., 2014. Review of satellite-based surface solar irradiation databases for the engineering, the financing and the operating of photovoltaic systems, *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 1383-1391.
- Yang, K., Pinker, R. T., Ma, Y., Koike, T., Wonsick, M. M., Cox, S. J., Zhang, Y., Stackhouse, P., 2008. Evaluation of satellite estimates of downward shortwave radiation over the Tibetan Plateau, *J. Geophys. Res.*, vol. 113, D17204.

DETERMINATION OF GLOBAL SOLAR IRRADIATION REGIMES OVER NORTHEAST BRAZIL FROM GL SATELLITE MODEL DATA

Abstract. *Previous studies have shown that the Northeast of Brazil (NEB) has favorable climatic characteristics for the use of the solar resource. However, few studies investigate the typical patterns of spatio-temporal solar radiation variability in this region, mainly using satellite data. The present work aims to describe the different annual cycles of global solar irradiation and global atmospheric transmittance (K_t) over the NEB, using satellite data based on GLL.2 model. This model runs in operational mode in CPTEC/INPE and some output products are available on the web page <http://satellite.cptec.inpe.br/radiacao/>. GL based data show advantages over data from station network, because of their greater and more detailed spatial coverage as well as more complete time series. The satellite model quality is illustrated by showing comparison results with ground truth (provided by INMET network) for the year 2016. In order to identify typical regimes, a clustering method similar to the k-means was applied to South America and neighboring oceanic area, searching for 21 groups and considering a significant set of selected pixels and their average annual cycle (monthly values) for 2001-2015 period. We identified 11 from 21 groups over NEB region (7 continental and 4 mainly oceanic also found in isolated continental areas). The geographical distribution of these regimes as well as the annual cycles of global irradiation and K_t are presented. The results show annual cycles clearly different between climatic zones. The proposed approach based on GL data allows better spatial representation, mainly in transition regions between distinct regimes, with low computational cost and satisfactory accuracy.*

Key words: *Solar radiation, Northeast Brazil, GOES satellite*