

INTERCOMPARAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS PARA ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO SOLAR EM PARTE DO NORDESTE BRASILEIRO

Francisco J. Lopes de Lima – francisco.lopes@inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Ciência do Sistema Terrestre
Universidade Federal do Estado de São Paulo, Instituto do Mar

Fernando Ramos Martins – fernando.martins@unifesp.br

Universidade Federal do Estado de São Paulo, Instituto do Mar

Rodrigo Santos Costa – rodrigo.costa@inpe.br

André Rodrigues Gonçalves – andre.goncalves@inpe.br

Jefferson Gonçalves de Souza – jefferson.souza@inpe.br

Silvia Vitorino Pereira – silvia.pereira@inpe.br

Eduardo Weide Luiz – eduardo.luiz@inpe.br

Marcelo Pizzuti Pes – marcelo.pes@inpe.br

Enio Bueno Pereira – enio.pereira@inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Ciência do Sistema Terrestre

Resumo. O objetivo principal deste estudo foi avaliar os resultados de dois modelos numéricos – as simulações do modelo BRASIL-SR realizadas para elaboração da segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar e estimativas do modelo meteorológico de mesoescala WRF – e as suas capacidades em simular a irradiação solar incidente à superfície, em especial as componentes: global horizontal e direta normal. Para isso, foi realizado um estudo de caso, intercomparando suas estimativas para o ano de 2014, em uma porção da região Nordeste do Brasil, tomando como base os valores das simulações na estação Petrolina – PE, da rede SONDA. Os resultados indicam que as estimativas do modelo BRASIL-SR apresentam menores valores de viés e RMSE, com ligeira subestimativa dos valores simulados (em torno de $-150 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$ e $440 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$, para a irradiação solar global, respectivamente), enquanto que o modelo WRF tende a superestimar os valores simulados (viés de $1400 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$ e RMSE de $1700 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$). Os dois modelos conseguem representar as principais feições da irradiação solar ao longo do ano, mas diferem em termos da variabilidade intranual da irradiação solar e do seu comportamento médio.

Palavras-chave: Modelos Numéricos, Irradiação Solar, SONDA.

1. INTRODUÇÃO

O atendimento da demanda energética mundial primária depende, em grande parte, do uso de combustíveis fósseis. Entretanto, o consumo dessas fontes de energia vai na contramão dos principais apelos da comunidade científica, pois lançam na atmosfera uma grande quantidade de gases - especialmente óxidos de carbono - relacionados à intensificação do efeito estufa. No caso do Brasil, a matriz energética já contempla de forma exemplar o emprego de fontes renováveis de energia, principalmente a hidroeletricidade e a biomassa; contudo, esta participação precisará ser ainda maior, já que o País também acompanha esse crescimento de maneira proporcional (Goldemberg e Lucon, 2012). As energias renováveis, em especial as de fonte solar e eólica, representam importante opção não só pelas vantagens inerentes à diversificação e complementaridade das fontes de energia, como também pelo fato de que já existir grande pressão mundial para estabilizar as taxas de emissão de carbono para a atmosfera, levando a reprimir o crescimento do uso de combustíveis fósseis.

O aproveitamento da energia da radiação solar incidente na superfície é uma alternativa para complementar a matriz energética brasileira atual, que se baseia principalmente em sistemas de geração hidroelétrica e termelétricas alimentadas com uso de combustíveis fósseis (ANEEL, 2016; Pereira *et al.* 2006; 2017). A conversão de energia solar em energia elétrica ou térmica possui impactos reduzidos e emissão de poluentes nula durante a operação da planta de geração. Contudo, além das dificuldades tecnológicas ainda não solucionadas, relacionadas à sua variabilidade de oferta e dependência às condições de tempo e clima, outra barreira que se opõe à exploração e uso pleno desta abundante fonte energética é o custo relativamente alto em relação à energia hidroelétrica. Desta forma, no cenário atual, a energia solar e outras energias renováveis não serão empregadas imediatamente em substituição aos combustíveis fósseis ou à energia hidráulica e sim gradativamente inseridas, de forma a complementar às atuais fontes através de sistemas energéticos híbridos e de geração distribuída. As limitações ao uso da energia solar tendem a ser reduzidas ou até mesmo eliminadas com o tempo, principalmente em resposta ao crescimento da demanda de energia mundial devido ao crescimento das economias de países em desenvolvimento, ao aparecimento de novas tecnologias de armazenamento de energia e ao crescimento da escala de mercado das mesmas.

Mesmo com o potencial solar já reconhecido no território brasileiro, dados confiáveis sobre essa variável ainda são escassos no País. Cita-se Martins e Pereira (2011), Martins *et al.*, (2007), Leal e Tiba (2006) e Lima *et al.*, (2016), que ao investigarem a disponibilidade e a variabilidade da irradiação solar no Brasil, enfrentaram muitas dificuldades em função da baixa densidade de estações solarimétricas no território brasileiro. O conhecimento da distribuição

espacial do recurso solar deve ser alcançado com uso de modelos numéricos, modelos de transferência radiativa ou modelos de previsão de tempo e clima, com parametrizações que considerem processos físicos relevantes e que tenham sido validados com dados observados (Martins *et al.* 2007). Embora dados coletados em superfície, com instrumentos adequados e observados os cuidados devidos de operação e manutenção sejam a fonte mais segura para o conhecimento do potencial local de energia solar, pesquisas indicam que os erros de interpolação de dados observados em estações de superfície afastadas em mais de 30 km entre si apresentam erro superiores a dados de modelos numéricos (Perez *et al.* 1997; Martins e Pereira, 2012).

Modelos numéricos de previsão de tempo são amplamente usados nos centros meteorológicos e encontram uma gama de aplicações em áreas como agricultura, recursos hídricos, turismo, dentre outras. Estes modelos são inicializados com dados de modelos globais é comum que estes centros mantenham sistemas com estas previsões numéricas, baseados em modelos atmosféricos de área limitada e com resoluções espaciais da ordem de alguns quilômetros. Vários modelos numéricos de mesoescala, como por exemplo, o RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) descrito em Cotton *et al.*, (2003), o RSM (*Regional Spectral Model*) descrito em Juang e Kanamitsu (1994), o MM5 descrito em Duhdia *et al.*, (2005), resolvem processos físicos desde a superfície até a alta atmosfera. Estes modelos são aplicados desde estudos de previsão de tempo, até a avaliação de dispersão de poluentes. O modelo meteorológico de mesoescala usado neste trabalho foi o WRF (*Weather Research and Forecasting*).

O modelo atmosférico WRF é um modelo de previsão numérico do tempo, desenvolvido tanto para fins de pesquisa quanto operacionais. Foi desenvolvido conjuntamente por uma série de instituições e agências governamentais: *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), *Forecast Systems Laboratory* (FSL), *Air Force Weather Agency* (AFWA), *Naval Research Laboratory*, *Oklahoma University* e *Federal Aviation Administration* (FAA). Foi concebido para ser uma ferramenta de topo na arte da simulação atmosférica, flexível, portátil, e eficiente em variadas plataformas de computação, sendo de domínio público e disponibilizado gratuitamente (Skamarock, *et al.* 2005; 2008). Já o modelo BRASIL-SR foi desenvolvido no Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia – LABREN no Centro de Ciências do Sistema Terrestre – CCST do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC (Martins *et al.* 2007).

Portanto, o objetivo deste trabalho é a intercomparação dos resultados de dois modelos numéricos - BRASIL-SR e WRF - no diagnóstico da irradiação solar e a avaliação de qual deles apresenta melhores resultados na região em estudo. Em especial, verificar a capacidade destes modelos em simular os campos de irradiação solar e, conseqüentemente, seu posterior uso na quantificação de potencial. A região de estudo será parte da região Nordeste do Brasil, compreendendo os Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e parte dos estados do Maranhão, Piauí, Bahia e Sergipe. Para tal, serão realizadas simulações durante todo o ano de 2014, sendo validados pela a estação da rede SONDA de Petrolina - PE.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

Este tópico descreve, sucintamente, as principais características climatológicas da região Nordeste do Brasil, a qual engloba a área avaliada neste estudo. Trata-se de uma região com uma grande variedade de fatores climatológicos e antrópicos. É a região do país mais subdividida politicamente, com nove estados: Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe, totalizando uma área de 1.558.196 km², o que corresponde a 18% do território brasileiro. Costuma ser dividida em três climas principais, com precipitações anuais variando entre 300 e 2000 mm, sendo estes: clima litorâneo úmido, estendendo-se do litoral da Bahia ao do Rio Grande do Norte; clima tropical, em áreas dos estados da Bahia, Ceará, Maranhão e Piauí; e clima tropical semiárido, em todo o sertão nordestino (Kayano e Andreoli, 2009).

Esta precipitação apresenta distribuição desigual ao longo do ano e grande variabilidade espaço-temporal, estando basicamente associada a sistemas sinóticos ou circulações atmosféricas regionais, como os Anticiclones Subtropicais do Atlântico Sul (ASAS) e Atlântico Norte (ASAN), e o cavado equatorial (Kayano e Andreoli, 2009). A caracterização das chuvas no Nordeste é bastante complexa, sendo identificados três regimes de precipitação: no Norte da região (Ceará, Rio Grande do Norte, interior da Paraíba e Pernambuco) as chuvas ocorrem no outono associadas ao deslocamento mais ao sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (Kousky, 1979; Molion, 2002); no litoral Leste (desde o litoral do Rio Grande do Norte até a Bahia) as precipitações são devido à influência das massas de ar tropical ou por distúrbios ondulatórios de leste e na parte Sul (Bahia e partes do Maranhão, Piauí e Pernambuco) a precipitação ocorre no verão pela atuação de sistemas frontais, convecção local e vórtices ciclônicos. Também é importante mencionar a atuação das estruturas de brisa e a convecção local, que mesmo sendo mecanismos de menor escala, contribuem para os totais pluviométricos nas regiões litorâneas.

O Nordeste Brasileiro apresenta elevadas médias anuais de temperatura do ar, com valores entre 20 e 28 °C. Entretanto, em áreas de elevadas altitudes, como a Chapada Diamantina e o Planalto da Borborema, as médias anuais de temperatura atingem valores inferiores a 20°C (Kayano e Andreoli, 2009; Pereira *et al.* 2006; 2017). A elevada incidência de radiação solar, com valores médios para irradiação global estimados em 5,5 kWh/m², caracteriza a região como sendo aquela de maior potencial de energia solar disponível no Brasil, de acordo com o Atlas Brasileiro de

Energia Solar (Pereira *et al.* 2017). A localização da área de estudo, bem como, a localização da estação SONDA de Petrolina-PE, utilizada neste estudo, pode ser verificada na Fig. 1.

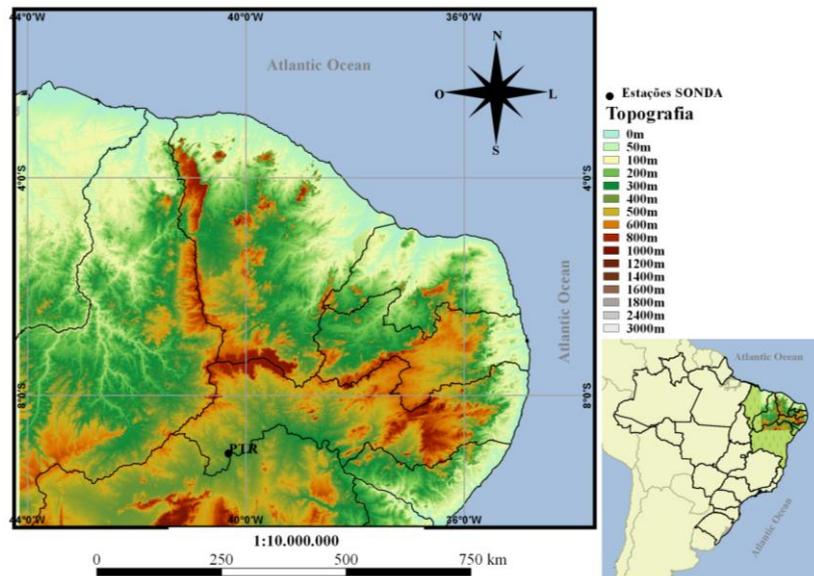


Figura 1 - Área de estudo e domínio do modelo WRF e em preto a localização da estação de Petrolina – PE (PRT), bem como a topografia da região.

A variabilidade da irradiação solar no Nordeste do Brasil é significativamente heterogênea, seja por efeitos dinâmicos provocados pela sua topografia ou pela atuação dos diferentes sistemas atmosféricos que atingem esta região, apresentando grande variabilidade espaço-temporal. A radiação solar pode ser mais intensa em algumas áreas que em outras e pode aumentar sua intensidade por alguns meses do ano. A principal razão destas variações são os fenômenos meteorológicos presentes. O principal modulador da dinâmica climática e variações interanuais na Região Nordeste do Brasil são as temperaturas de superfície (TSMs) dos oceanos Pacífico equatorial, por meio dos episódios de El Niño e La Niña, e Atlântico Tropical, através do padrão de oscilação em dipolo, que, dependendo de sua configuração, altera o posicionamento da Zona de Convergência Intertropical – ZCIT (Kousky, 1979; Molion, 2002; Cavalcanti *et al.* 2009).

As mudanças no comportamento da circulação geral da atmosfera ao longo do ano provocam significativas variações mensais na irradiação solar de grande importância em estudos de energia solar, sendo estas associadas principalmente à movimentação da ZCIT. Sendo assim, é conveniente analisar a climatologia da região sob o ponto de vista do comportamento mensal ou sazonal, uma vez que fenômenos climáticos (ou suas combinações em diferentes escalas de tempo e espaço) podem provocar variações significativas na radiação solar de uma determinada região, ainda que sua média anual não evidencie este comportamento.

2.2 O modelo WRF

O modelo meteorológico de mesoescala WRF, *Wether Research and Forecasting*, é um modelo não hidrostático de previsão de tempo e clima. Os conceitos físicos considerados são baseados na conservação de massa, explicitando as variações de energia, momentum e umidade do ar. Ele tem um código-fonte simples, o que facilita o seu entendimento e aplicação. Possui um sistema de assimilação de dados com captação em três dimensões e além disso, pode ser configurado para resoluções horizontais desde a escala de metros até milhares de quilômetros.

As principais parametrizações físicas desde modelo estão divididas em cinco categorias distintas: microfísica, parametrização de nuvens, parametrização da CLP, modelos de ocupação do solo e Radiação. As opções de esquemas físicos foram sendo incorporadas ao WRF com a intenção de produzir um único sistema de modelagem. Assim, o maior problema enfrentado consiste em escolher um grupo de parametrizações que seja adequado às condições da região a ser estudada e também à capacidade computacional disponível. Maiores detalhes quando a estrutura numérica e computacional do modelo pode ser obtida em Skamarock *et al.*, (2008).

2.3 O modelo BRASIL-SR

Trata-se de um modelo físico utilizado na obtenção de estimativas da irradiação solar incidente na superfície, que teve como base o modelo alemão IMGK (Stuhlmann *et al.* 1990). Utilizando a aproximação de “Dois-fluxos” na solução da equação de transferência radiativa, o BRASIL-SR faz uso de dados climatológicos (temperatura do ar, albedo de superfície, umidade relativa, visibilidade atmosférica) e elevação da superfície. A cobertura de nuvens é considerada como principal fator de modulação da transmitância atmosférica, sendo determinada a partir de imagens de satélite geostacionário (Martins, 2001). Os arquivos com os dados de entrada são preparados através da base de dados

climatológicos e do processamento das imagens de satélite para o período de execução, onde é obtida a cobertura efetiva de nuvens. Após o tratamento dos dados de entrada, o modelo resolve a equação de transferência radiativa utilizando a aproximação de “Dois-Fluxos” para o cálculo das componentes do fluxo de radiação solar.

As estimativas de irradiação solar fornecidas pelo modelo BRASIL-SR foram validadas por meio de comparação com valores medidos em superfície em estações distribuídas pelo território brasileiro. Foram utilizados dados coletados em estações da rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais para o Setor Energético) e pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). O Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira *et al.* 2017) foi elaborado a partir das saídas do modelo BRASIL-SR.

2.4 Metodologia

Ambos os modelos foram integrados por todo o ano de 2014, para a grade mostrada na Fig. 1. Para execução do modelo WRF, optou-se por utilizar a versão 3.8, lançada em abril de 2016, com as seguintes parametrizações:

- Ondas longas: RRTMG (*Rapid Radiative Transfer Method*), descrito em (Iacono *et al.* 2008) que é uma nova versão do RRTM que inclui o método de *Monte-Carlo independente column approximation*;
- Ondas curtas: RRTM (*Rapid Radiative Transfer Method*), baseado no esquema disponível no modelo MM5 (Mlawer *et al.* 1997);
- Microfísica: optou-se pela parametrização de Thompson *et al.* (2004), que foi desenvolvida com o intuito de melhorar a previsão de eventos de congelamento para alertas de segurança na aviação;
- Cúmulos -Freitas, descrita em Grell *et al.*, (2014) é um melhoramento da parametrização de Grell e Devenyi (2002) que pode ser usado em alta resolução;
- Modelo de solo-superfície: Noah LSM (Land Surface Model) de quatro camadas, que inclui zona de radicular, evapotranspiração, drenagem do solo e escoamento superficial, e considera categorias de vegetação, fração e textura do solo;
- Camada limite atmosférica Mellor-Yamada-Janjic, descrito em Janjic (1994), usa termos contra gradientes para representar fluxos devidos a gradientes não locais, adicionando um tratamento explícito de camada de entranhamento no topo da CLP.

As simulações com o modelo de mesoescala devem atender uma resolução espacial compatível com a modelagem. Neste sentido, adotou-se uma grade com uma área retangular, com 5 km de resolução horizontal (totalizando 222 pontos em x e 200 pontos na direção y) e 50 níveis verticais; esta área cobre a região de interesse, toda a parte norte do Nordeste incluído os Estados de Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará e parte dos Estados do Maranhão, Piauí, Sergipe e Bahia. As condições iniciais e de contorno do modelo foram obtidas a partir das saídas do modelo atmosférico global GFS (*Global Forecast System*) do NCEP (*National Center for Environmental Prediction*), com resolução horizontal de 0,5° x 0,5° e resolução temporal de 6 horas. A frequência das análises feitas pelo modelo foram padronizadas para intervalos horários, sendo posteriormente calculadas as integrais diárias e as médias mensais das integrais diárias. As simulações do modelo WRF para o ano de 2014 foram realizadas com a sua inicialização às 1800 UTC do dia 31 de dezembro de 2013, estendendo-se até 31 de janeiro de 2014; e assim por diante, para cada um dos meses do ano de 2014. As primeiras 6 horas de simulações de cada mês foram consideradas como “*spin-up*” e excluídas das avaliações.

Já o BRASIL-SR utilizou imagens dos canais visível e infravermelho do satélite GOES 13, para todo o ano de 2014, para determinação dos coeficientes de cobertura de nuvens – o principal fator de transmitância atmosférica do modelo. Também foram utilizadas médias mensais dos dados de temperatura do ar, umidade relativa e visibilidade horizontal oriundos do INMET, além de dados de espessura óptica dos aerossóis em 550 nm de reanálises do MACC/ECMWF (Inness *et al.* 2013). A resolução espacial das saídas do modelo BRASIL-SR é de aproximadamente 3km x 5km. Para este estudo, foram utilizados os dados gerados para a segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar, que passaram por uma etapa de pós-processamento, com correção estatística nos mapas finais de irradiação solar, conforme mencionado em Pereira *et al.*, (2017).

3. RESULTADOS

Na Fig. 2 são apresentados os mapas das médias mensais da irradiação solar global simulados pelo modelo WRF, na região em estudo, para todo o ano de 2014. Similarmente, a Fig. 3 apresenta os mapas médios mensais de irradiação solar global simulados pelo modelo BRASIL-SR, para o mesmo período. Observa-se que os dois modelos tendem a representar feições similares durante todo o ano, indicando que eles possuem uma caracterização de topografia e parametrizações de processos físicos suficientemente similares.

Nos mapas mensais do WRF (Fig. 2), observa-se que os maiores valores são registrados no mês de janeiro (em torno de 8,1 kWh/m².dia), diminuindo gradativamente até o mês de junho (com 4,5 kWh/m².dia). A irradiação solar volta a crescer até novembro e diminui no mês de dezembro. Já os mapas médios mensais gerados pelo modelo

BRASIL-SR diferem deste padrão, apresentando um ciclo de comportamento mais coerente com os regimes pluviométricos da região: os maiores valores são observados no mês de setembro (por volta de 7,1 kWh/m².dia) e diminuem gradativamente até o mês de junho (com 4,0 kWh/m².dia), voltando a crescer até encontrar um novo máximo em setembro.

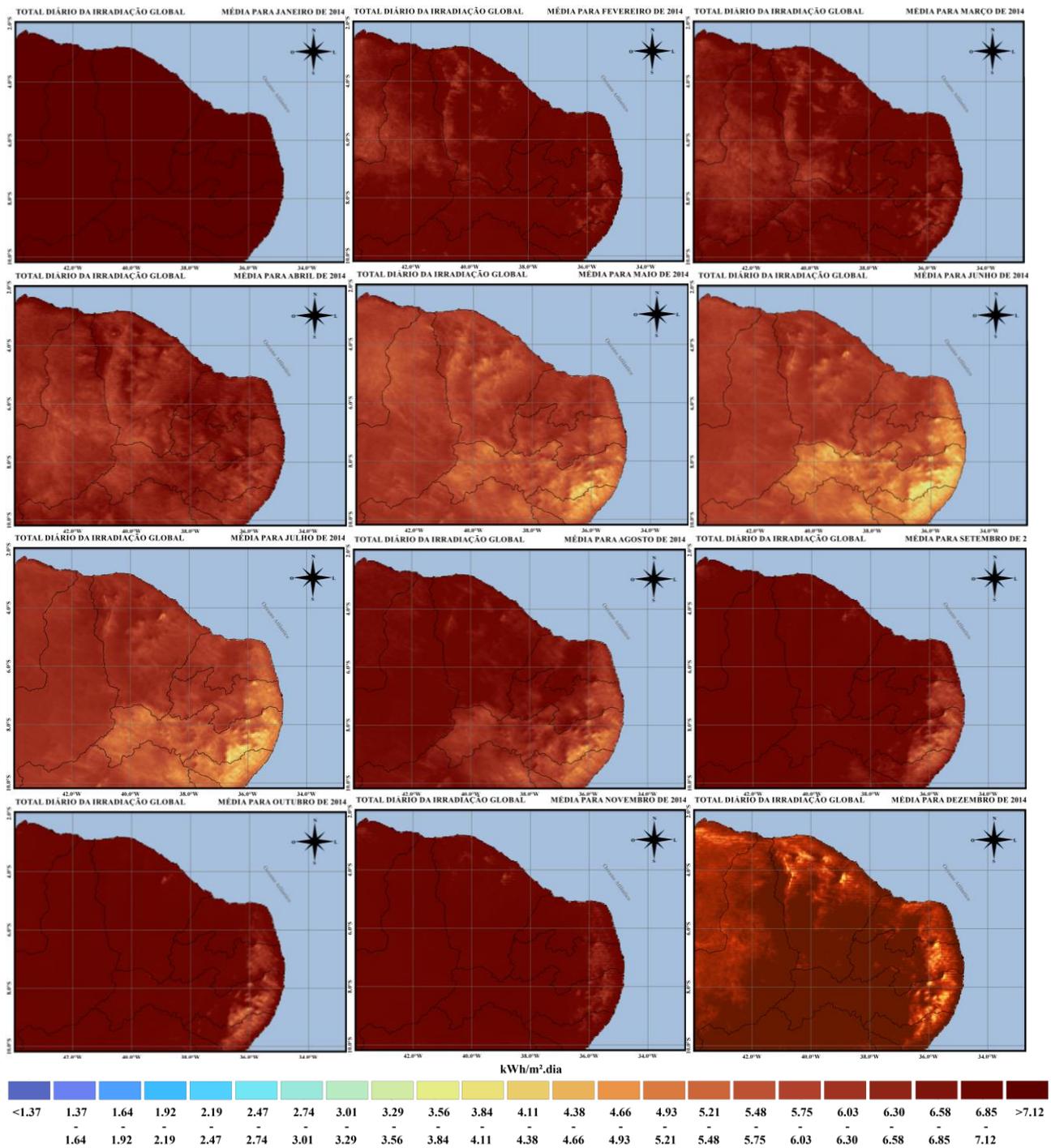


Figura 2 - Médias mensais do total diário da irradiação global horizontal para o modelo WRF para o ano de 2014.

Para tornar as diferenças das simulações dos modelos espacialmente visualizáveis, foram gerados mapas que mostram a diferença entre os seus resultados (modelo WRF – modelo BRASIL-SR), mostrados na Fig. 4. Percebe-se que os mapas apresentam apenas valores positivos, o que indica que o modelo WRF, sistematicamente simula valores superiores ao BRASIL-SR. Destaca-se o primeiro trimestre do ano de 2014 como sendo aquele onde as diferenças médias foram maiores (valores de até 2466 Wh/m².dia, 2572 Wh/m².dia e 2385 Wh/m².dia para os meses de janeiro, fevereiro e março, respectivamente) – o que já era verificado apenas na análise isolada dos mapas. Já as menores diferenças entre os modelos foram observadas entre o segundo e o terceiro trimestre, nos meses de junho, julho e agosto (com valores de 227 Wh/m².dia, 371 Wh/m².dia, 243 Wh/m².dia).

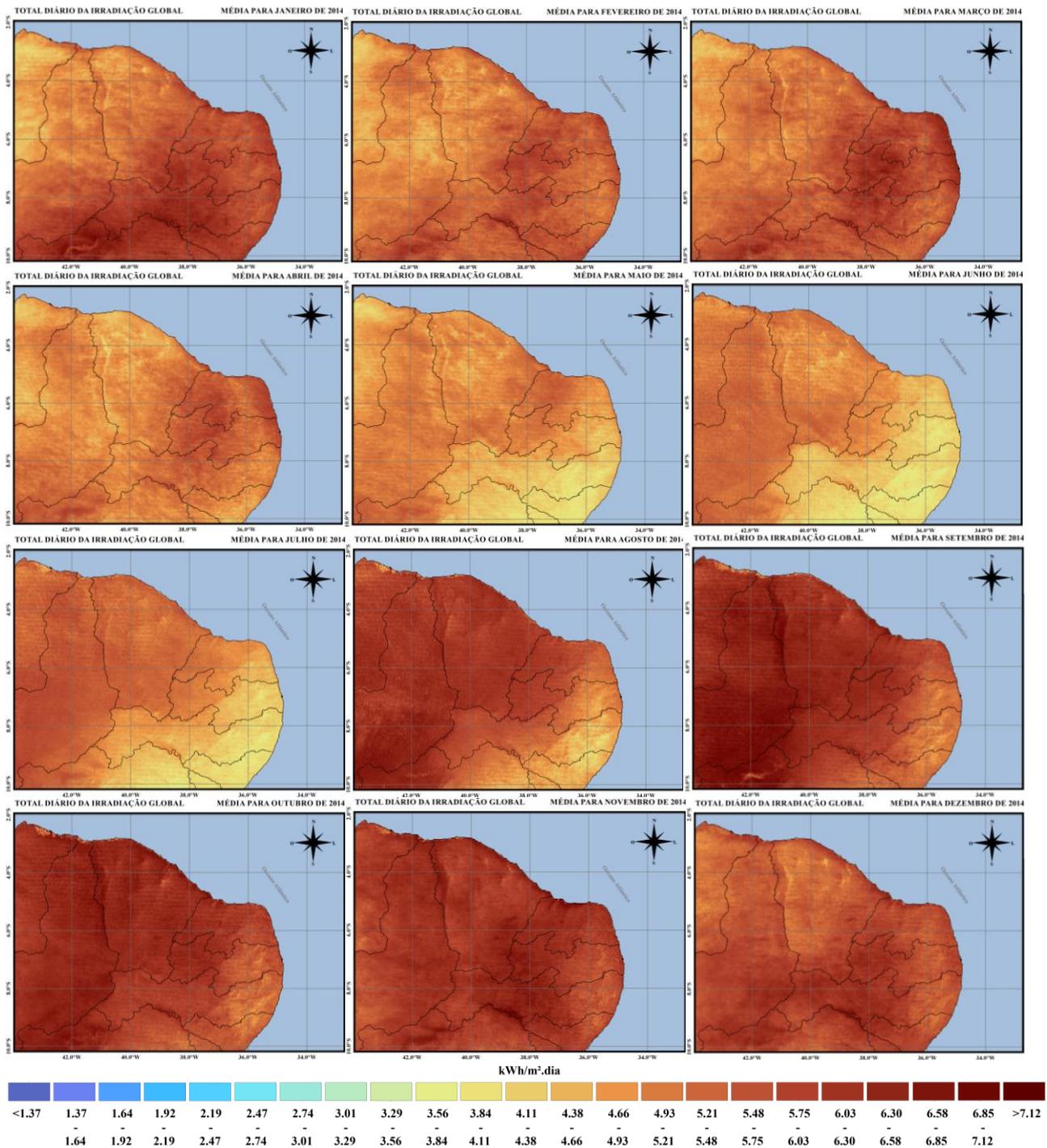


Figura 3 - Médias mensais do total diário da irradiação global horizontal para o modelo BRASIL-SR para o ano de 2014.

O comportamento médio anual dos modelos e dos dados observados de irradiação solar global na estação SONDA de Petrolina, apresentado na Fig. 5, onde fica clara a tendência do modelo WRF em superestimar os valores simulados. Os valores médios mensais simulados por ele estão sempre acima de 1000 Wh/m².dia, chegando a mais de 2000 Wh/m².dia em dezembro. Os resultados do modelo BRASIL-SR apresentam uma ligeira tendência de subestimativa, com as maiores diferenças em relação aos dados medidos verificada no mês de fevereiro.

Estas tendências dos dois modelos nas estimativas da irradiação solar global são melhores apresentadas nas Fig. 6 e 7, onde são mostrados os diagramas de dispersão e a evolução dos valores médios de RMSE e Viés durante o ano de 2014, respectivamente. O WRF apresenta maiores valores de RMSE e Viés médios anuais de 1405 Wh/m².dia e 1761 Wh/m².dia, respectivamente. Os maiores valores estão entre janeiro - maio e setembro - dezembro. Já os resultados do modelo BRASIL-SR apresentaram RMSE e Viés médio anual de -148 Wh/m² e 441 Wh/m² com um comportamento muito parecido durante todo o ano.

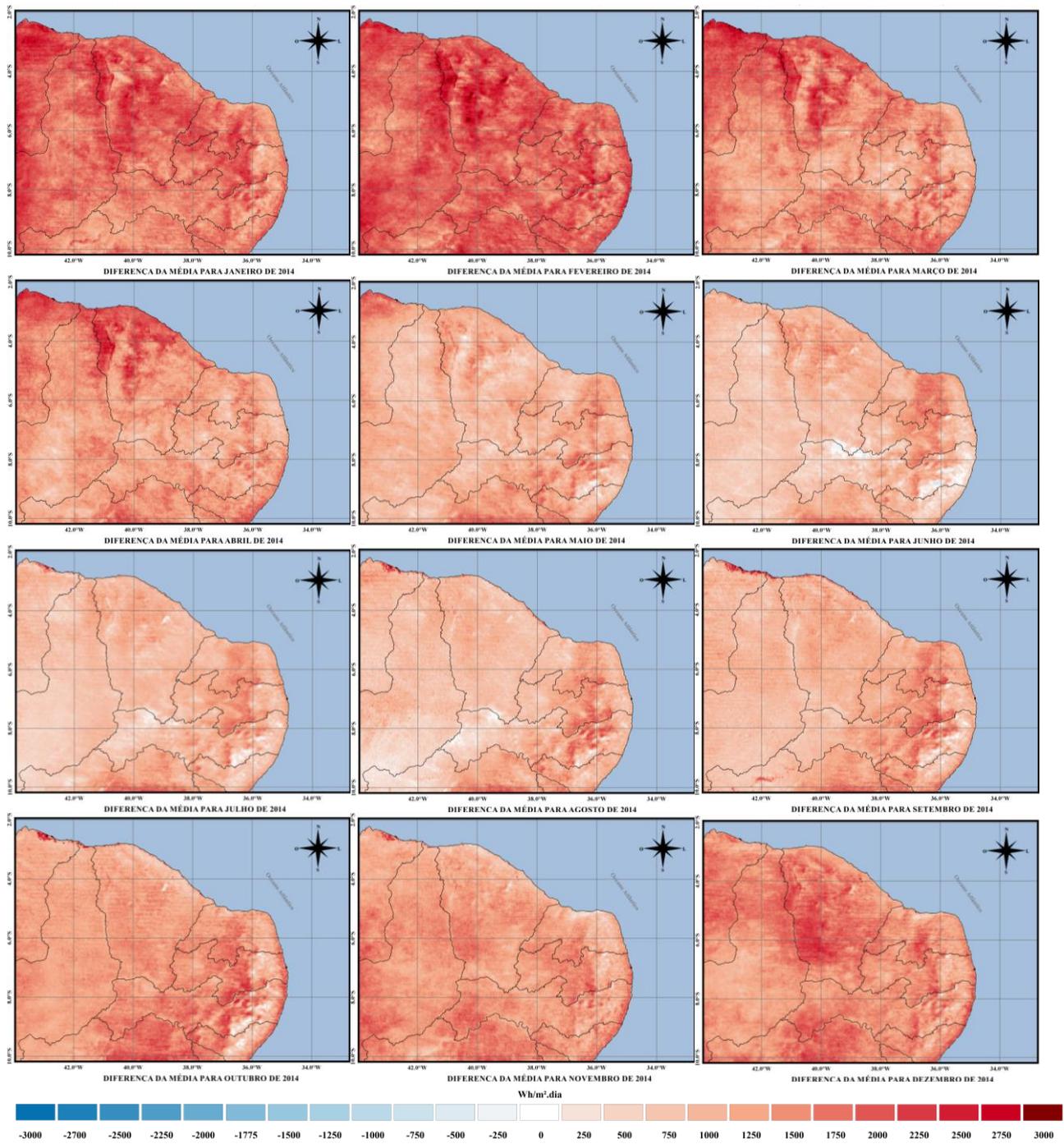


Figura 4 - Médias mensais das diferenças do total diário da irradiação global horizontal para os modelos WRF e BRASIL-SR para o ano de 2014.

Avaliando a capacidade dos modelos na simulação da irradiação solar direta, a Fig. 8 apresenta os diagramas de dispersão desta variável. Percebe-se que mais uma vez os resultados do modelo BRASIL-SR apresentam menor RMSE e Viés, com valores médios anuais de $800 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$ e $-32 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$, respectivamente. Enquanto o WRF apresentam valores de RMSE e Viés de $2623 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$ e $1526 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$, respectivamente.

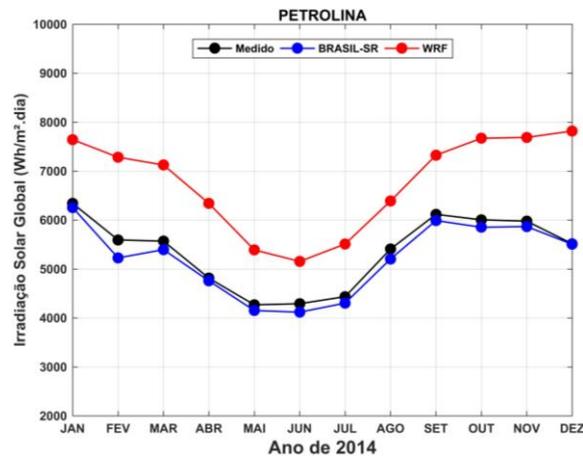


Fig. 5. Comparação da irradiação solar global ($\text{Wh/m}^2.\text{dia}$), média mensal das integrais diárias, durante o ano de 2014, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados pelo modelo BRASIL-SR (linha azul) e os dados simulados pelo modelo WRF, (linha vermelha), para a estação de Petrolina-PE.

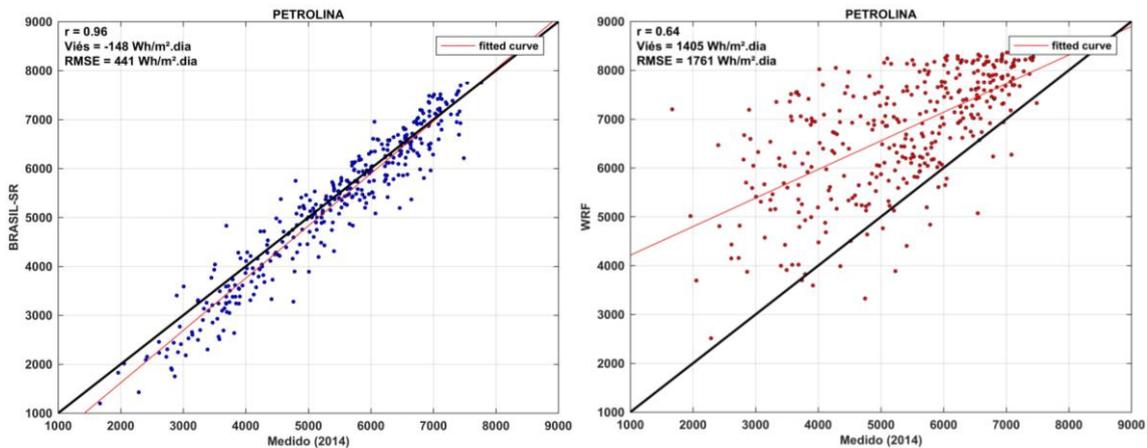


Figura 6 - Diagrama de dispersão (média mensal das integrais diárias da irradiação global), durante o ano de 2014, modelo BRASIL-SR (linha azul) e modelo WRF, (linha vermelha), para a estação de Petrolina-PE.

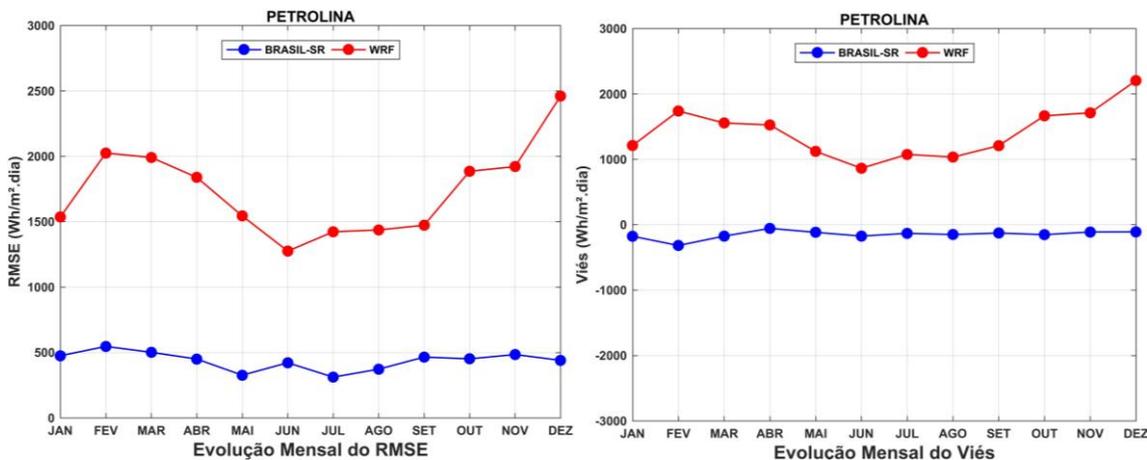


Figura 7 - Comparação da evolução mensal dos índices RMSE e Viés da irradiação global ($\text{Wh/m}^2.\text{dia}$), média mensal das integrais diárias, durante o ano de 2014, pelo modelo BRASIL-SR (linha azul) e pelo modelo WRF, (linha vermelha), para a estação de Petrolina-PE.

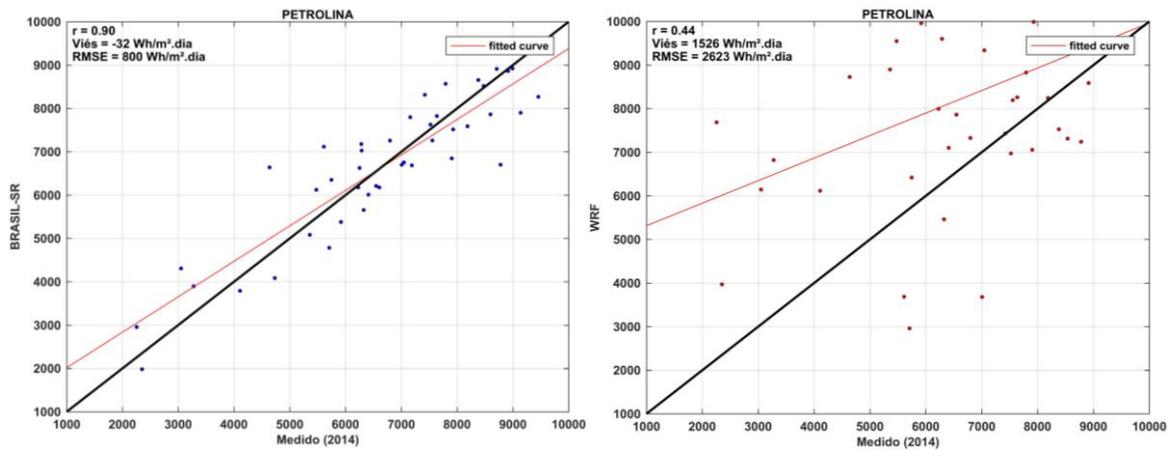


Figura 8 - Diagrama de dispersão (média mensal das integrais diárias da irradiação direta normal), durante o ano de 2014, modelo BRASIL-SR (linha azul) e modelo WRF, (linha vermelha), para a estação de Petrolina-PE.

4. CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho era o de intercomparar os resultados das simulações de irradiação solar de dois modelos numéricos, com diferentes metodologias. Para tal, dados do modelo BRASIL-SR utilizados na segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar foram confrontados com integrações do modelo WRF, para o ano de 2014. As avaliações com dados de superfície da estação SONDA de Petrolina mostraram que o WRF superestima sistematicamente a irradiação solar global e a irradiação solar direta, além de não ter representado o ciclo anual destas componentes de maneira adequada. Entretanto, as principais feições e as características médias mensais foram bem simuladas pelos dois modelos.

Os resultados também mostram que a correção estatística aplicada nas saídas de irradiação solar global e irradiação solar direta do BRASIL-SR, que foram utilizadas pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira *et al.* 2017), apresentaram elevada correlação e baixos valores de RMSE e Viés, trazendo maior confiabilidade aos resultados apresentados pela publicação supracitada.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro e concessão de bolsas de pós-doutorado e pesquisa aos autores. Este trabalho também é uma contribuição do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas (INCT-MC) financiado pela FAPESP 2014/50848-9, CNPq 465501/2014-1, e CAPES/FAPS N° 16/2014.



REFERÊNCIAS

- Cavalcanti, I. F. A., Ferreira, N. J., Silva, M. G. A. J., Dias, M. A. F., 2009. Tempo e clima no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, cap. 13, p. 197-212.
- Cotton, W. R., Pielke, R. A., Walko R. L., Liston, G. E., Tremback, C. J., Jiang, H., Mcanelly, R. L., Harrington, J. Y., Nichols, M. E., Carrio, G. G., Mcfadden, J. P., 2003. Current Status and Future Directions. *Meteorology and Atmospheric Physycs*. v.82, n.1, p.5-29.
- Duhdia, J., Gill, D., Manning, K., Wang, W., Bruyere, C., 2005. PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and Users' Guide (MM5 Modeling System) Version 3.
- Goldemberg, J., Lucon, O., 2012. Energia, meio ambiente e desenvolvimento. 3. Ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. 400 p. ISBN (978-85-314-1113-7).
- Grell, G. A., Freitas, S. R., 2014. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. *Atmospheric Chemistry Physics*, 14, 5233-5250.
- Grell, G.A., Devenyi, D., 2002. A new approach to parameterizing convection using ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*. v. 29, 1693.
- Iacono, M., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A., Collins, W. D., 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2008JD009944.
- Inness, A., Baier, F., Benedetti, A., Bouarar, I., Chabrillat, S., Clark, H., Clerbaux, C., Coheur, P., Engelen, R. J., Errera, Q., Flemming, J., George, M., Granier, C., Hadji-Lazaro, J., Huijnen, V., Hurtmans, D., Jones, L., Kaiser,

- J. W., Kapsomenakis, J., Lefever, K., Leitão, J., Razinger, M., Richter, A., Schultz, M. G., Simmons, A. J., Suttie, M., Stein, O., Thépaut, J.-N., Thouret, V., Vrekoussis, M., Zerefos, C., and The MACC Team. 2013. The MACC reanalysis: an 8 yr data set of atmospheric composition. *Atmos. Chem. Phys.*, n.13, p.4073-4109, doi:10.5194/acp-13-4073-2013.
- Janjic, Z. I., 1994. The step-mountain eta coordinate model: Further developments on the convection, viscous sublayer, and turbulent closure schemes. *Monthly Weather Review*, v. 122, p. 927-945.
- Juang, H. M. H., Kanamitsu, M., 1994. The NMC Nested Regional Spectral Model. *Monthly Weather Review*, Boston v.122, n.1, p.3-26.
- Kayano, M. T.; Andreoli, R. V. Clima da Região Nordeste do Brasil. In: Cavalcanti, I. F. A.; Ferreira, N. J.; Silva, M. G. A. J.; Dias, M. A. F. S., 2009. *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, cap. 14, p. 213-233.
- Kousky, V. E., 1979. Frontal influences on Northeast Brazil. *Monthly Weather Review*, v. 107, p. 1140-1153.
- Leal, S. S., Tiba, C., 2006. Iluminância e irradiação solar global na região Nordeste do Brasil. *Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural*.
- Lima, F. J. L., Pereira, E. B., Martins, F. R., 2016. Forecast for surface solar irradiance at the Brazilian Northeastern region using NWP model and artificial neural networks. *Renewable Energy*, v. 87, p. 807-8186.
- Martins, F. R., Pereira, E. B., 2011. Estudo comparativo da confiabilidade de estimativas de irradiação solar para o sudeste brasileiro obtidas a partir de dados de satélite e por interpolação/extrapolação de dados de superfície. *Revista Brasileira de Geofísica*. Vol. 29(2), p. 265-276.
- Martins, F. R., Pereira, E. B., Abreu, S. L., 2007. Satellite derived solar resources maps for Brazil under SWERA project. *Solar Energy*, v. 81, p. 517-528.
- Martins, F. R.; Abreu, S. L.; Pereira, E. B., 2012. Scenarios for solar thermal energy applications in Brazil. *Energy Policy*, Guildford, v. 48, p. 640-649.
- Martins, F.R., 2001. Influência do processo de determinação da cobertura de nuvens e dos aerossóis de queimada no modelo físico de radiação BRASIL-SR. 2001. (Tese de Doutorado) – INPE. São José dos Campos.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., 1997. Clough, S. A. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: Rrtm, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, v. 102, p. 16663-16682.
- MME, Ministério de Minas e Energias. “Balanço Energético Nacional 2016: ano base 2015”, 2016. Disponível em < https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf >, acessado em junho 2016.
- Molion, L. C. B, Bernardo, S. O., 2002. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 17, n. 1, p. 1-10.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Lima F. J. L., Rüther, R., Abreu, S. L., Tiepolo, G. M., Pereira, S. V., Souza, J. G., 2017. *ATLAS Brasileiro de energia Solar*. 2. ed. São José dos Campos. 80 p. ISBN (978-85-17-00089-8).
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Rüther, R., Abreu, S. L., 2016. *ATLAS Brasileiro de energia Solar*. 1. ed. São José dos Campos. 64 p. ISBN (9788517000300).
- Perez, R.; Seals, R.; Zelenka, A., 1997. Comparing Satellite Remote Sensing and Ground Network Measurements for the Production of Site/Time Specific Irradiance Data. *Solar Energy*, Phoenix, v.60, n.2, p. 89–96, 1997.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W.; Powers, J. G., 2008. Description of the Advanced Research WRF Version 3 National Center for Atmospheric Research Boulder.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W.; Powers, J. G., 2005. A Description of the Advanced Research WRF Version 2.
- 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. Applied Meteorology*, v.29, n.7, p.586-603.
- Thompson, G., Rasmussen, R. M., Manning, K., 2004. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. *Monthly Weather Review*, v. 132, p. 519-542.

INTERCOMPARISON OF NUMERICAL MODELS FOR ESTIMATION OF SOLAR IRRADIATION IN PART OF NORTHEASTERN REGION OF BRAZIL

Abstract. *The main objective of this study was to evaluate the results of two numerical models - the BRASIL-SR model simulations conducted for the preparation of the second edition of the Brazilian Atlas of Solar Energy and estimates of the WRF mesoscale model - and their capabilities to simulate the solar irradiance incident on the surface, in particular the global horizontal and direct normal components. To do this, we conducted a case study, intercomparison of the estimates for the year 2014 in a portion of the Northeastern region of Brazil, based on the values of the measured in Petrolina – PE station, network SONDA. The results indicate that estimates of the BRASIL-SR model feature lowest bias and RMSE, with slight underestimation of the simulated values (about -150 Wh/m².day and 440 Wh/m².day, for the global solar irradiation, respectively), while the WRF model tends to overestimate the simulated values (1400 Wh/m².day of bias and 1700 Wh/m².day of RMSE). The two models can represent the main features of solar irradiance over the year, but differ in terms of the variability of solar irradiance and intrannual and your average behavior.*

Key words: *Numerical Models, Solar Irradiation, SONDA.*