

Comparing Solar Data from NWP Models for Brazilian Territory

F. Lima, R. Costa, A. Gonçalves, M. Pes, E. Pereira, and F. Martins

Abstract—Brazil is experiencing continuous growth in the solar energy market over the last years, and it is expected that solar power plants will have a significant contribution to the Brazilian energy matrix soon. The solar irradiance variability is an important issue due to its impact on electricity distribution systems. However, solar energy variability has not been comprehensively evaluated in Brazil. The study aimed to assess the capacity of two numerical models of mesoscale in simulating the solar radiation conditions in the Northeastern region of Brazil. For this, a case study was conducted comparing the surface solar irradiation data acquired in 41 automated weather stations operating in the study area and managed by the Brazilian Institute of Meteorology with estimates provided by two weather mesoscale models BRAMS and WRF. The study indicated that the difference between the model's uncertainties is small (typically less than 5%) when evaluating the entire region of the Brazilian Northeast. However, local comparisons may show more notable discrepancies reflecting uncertainties in the estimates produced by the models.

Index Terms—Solar energy resource assessment, Numerical modeling, Seasonal patterns, Northeastern Brazilian region.

I. INTRODUÇÃO

O aproveitamento da energia a partir da radiação solar incidente na superfície é uma alternativa para complementar a matriz energética brasileira, que nos dias atuais é primariamente baseada em plantas hidroelétricas e termelétricas alimentadas com uso de combustíveis fósseis. Os entraves tecnológicos e econômicos para crescimento da participação da energia solar tendem a ser reduzidos ou até mesmo eliminados com o tempo, principalmente em resposta à evolução do nível de maturidade tecnológica, à consolidação do mercado internacional, e ao crescimento da demanda energética mundial associado ao desenvolvimento socioeconômico de países emergentes [1], [2]. Contudo, existem desafios ainda não solucionados, relacionados à variabilidade de oferta e dependência das condições de tempo e clima [3], [4].

A participação da energia solar na matriz elétrica nacional está crescendo rapidamente com a implementação de sistemas híbridos e de sistemas de geração distribuída [5], [6] e, assim, vem contribuindo para complementar as fontes de energia convencionais em uso na atualidade. Apesar do fato que o potencial solar está descrito para o território brasileiro com base em dados satelitais [7], [8], a disponibilidade de dados confiáveis coletados em estações de superfície ainda é escassa

no país. Estudos anteriores enfrentaram muitas limitações em função da baixa densidade de estações de coleta de dados radiométricos de classe 1 (no padrão internacional) ao investigar a disponibilidade e a variabilidade da irradiação solar no território brasileiro [7], [9]–[11].

O conhecimento e previsão do potencial disponível de energia solar tem um papel extremamente importante no apoio ao setor energético, no que se refere ao planejamento de operação tanto do sistema elétrico do País quanto de plantas de geração solar fotovoltaicas (PV) e as heliotérmicas (CSP) [9], [12]–[14]. Atualmente, há uma gama de modelos numéricos de alta resolução espacial e temporal capazes de simular os processos radiativos que ocorrem na atmosfera. No entanto, é de suma importância conhecer as incertezas associadas aos resultados destes modelos numéricos para subsidiar a tomada de decisões no setor elétrico nacional, principalmente com relação aos aspectos relacionados à sustentabilidade econômica dos empreendimentos.

A irradiância solar no Nordeste do Brasil possui algumas características peculiares, como discutido por Lima et al. [9]. Sua distribuição espaço-sazonal mostra que os maiores valores ocorrem durante a primavera austral e os menores valores são verificados no outono e inverno, período chuvoso em grande parte da região. Neste contexto, o presente trabalho avalia e compara o desempenho de dois modelos numéricos de mesoescala - o BRAMS (Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System) e WRF (Weather Research and Forecasting) - para a previsão da irradiação solar global incidente na superfície no Nordeste do Brasil (NEB). Os dois modelos atmosféricos são amplamente utilizados pela comunidade acadêmica brasileira em aplicações abrangentes como previsão de temperatura, precipitação e vento mas poucas informações estão disponíveis sobre seu uso em previsões de irradiação solar destinadas especificamente para atender o setor de energia. Os resultados mostram as limitações e diferenças entre os modelos sendo esta a principal contribuição do estudo. Além disso, pretende-se que o estudo possa contribuir para orientar o desenvolvimento de serviços de meteorologia aplicada para suporte da operação de plantas de geração solar no Nordeste do Brasil tanto sob o ponto de vista do empreendedor do setor elétrico quanto do Operador Nacional do Sistema elétrico brasileiro (ONS).

II. MATERIAIS E MÉTODOS

A. Área de Estudo

O estudo em questão compreende a porção norte da região Nordeste do Brasil (NEB) sujeita a uma diversidade de aspectos climatológicos e fatores antrópicos. A Fig. 1 mostra

Francisco J. L. Lima and Fernando R. Martins are with the Instituto do Mar, Universidade Federal de São Paulo (Unifesp), campus Baixada Santista, 11030-100 Brazil e-mail: (fernando.martins@unifesp.br).

Rodrigo S. Costa, André R. Gonçalves, Marcelo Pizutti Pes, and Enio B. Pereira are with the Centro de Ciência do Sistema Terrestre of Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

a localização geográfica da área de estudo. A área considerada possui $1.6 \cdot 10^6 \text{ km}^2$, correspondendo 18% do território brasileiro. Kayano e Andreoli [15] descrevem a climatologia da região com base em três climas principais: clima litorâneo úmido, estendendo-se por toda a costa leste do NEB; clima tropical, em áreas dos estados da Bahia, Ceará, Maranhão e Piauí; e clima tropical semiárido, em todo o sertão nordestino.

A precipitação no NEB apresenta grande variabilidade espaço-temporal com valores que variam entre 300 e 2000 mm. A precipitação está associada a sistemas sinóticos ou circulações atmosféricas regionais como os Anticiclones Sub-tropicais do Atlântico Sul (ASAS) e Atlântico Norte (ASAN), e o cavado equatorial [15]. Trata-se de uma caracterização bastante complexa, com interações em diversas escalas, onde são identificados três regimes de precipitação:

- no Norte da região – as chuvas ocorrem no outono associadas ao deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) em direção ao hemisfério Sul [16];
- na costa Leste – as precipitações ocorrem devido à influência das massas de ar tropical ou por distúrbios ondulatórios de leste;
- e na parte Sul – a precipitação ocorre durante o verão pela atuação de sistemas frontais, convecção local e vórtices ciclônicos.

O NEB apresenta elevadas médias anuais de temperatura do ar, com valores entre 20°C 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 [15], [17]. Para um maior aprofundamento sobre a climatologia no NEB, sugere-se a leitura de [17].

A elevada incidência de radiação solar na superfície, com valores médios para irradiação global na ordem de $5,5 \text{ kWh/m}^2$, caracteriza a região como sendo aquela de maior potencial de energia solar disponível no Brasil [7].

B. Dados Meteorológicos e Radiométricos

Os dados meteorológicos e radiométricos utilizados são valores horários de irradiação global compreendendo o período entre janeiro e dezembro de 2014. Os dados meteorológicos foram observados em 41 estações meteorológicas automáticas operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Estas estações dispõem de sensores para aquisição de parâmetros meteorológicos básicos como pressão atmosférica, temperatura do ar, precipitação, irradiação solar entre outras. O estudo também utilizou dados coletados na estação SONDA operada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em Petrolina. A localização das estações está apresentada na Fig. 1 com seu código de identificação atribuído pelo órgão competente.

C. Modelagem Atmosférica de Mesoescala

1) *Modelo BRAMS*: O modelo BRAMS (“Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System”), na versão 5.2, foi uma das ferramentas utilizada nesse estudo. Trata-se da versão brasileira do modelo RAMS, o Regional Atmospheric Modeling System, descrito em maior detalhamento

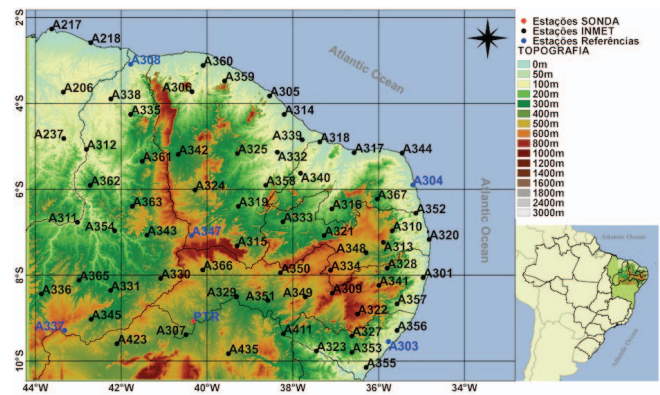


Fig. 1. Localização geográfica das estações automáticas de coleta de dados meteorológicos operadas pelo INMET e INPE na área de estudo – Nordeste Brasileiro (NEB).

em [18]. O modelo BRAMS foi desenvolvido com o objetivo de aprimorar esquemas de parametrizações numéricas para processos atmosféricos típicos nas regiões tropical e subtropical do Brasil. Inovações e melhorias foram implantadas tanto em termos de física e dinâmica da atmosfera, quanto com relação à eficiência computacional do modelo [19], [20].

O modelo BRAMS dispõe de 4 opções de parametrização para transferência radiativa, sendo um deles com tratamento explícito de água condensada e aerossóis [21]. A microfísica de nuvens segue o esquema numérico descrito por [18] e a parametrização de convecção rasa é descrita em [22], existindo também uma parametrização adicional introduzida por Freitas et al. [19]. O modelo BRAMS está em constante desenvolvimento por diversos grupos de pesquisa no Brasil para aprimoramento de funcionalidades e da representação numérica de processos físicos fundamentais [20]. A versão utilizada neste estudo está acoplada ao modelo CATT (“Coupled Aerosol and Tracer Transport”) que simula o transporte e a transformação química de gases e aerossóis integrado ao JULES (Joint UK Land Environment Simulator) [23].

2) *Modelo WRF*: O modelo de mesoescala WRF (“Weather Research and Forecasting”) é um modelo de previsão numérica de tempo para uso em atividades de pesquisa e de rotina operacional. Foi desenvolvido conjuntamente por instituições e agências governamentais incluindo a National Center for Atmospheric Research (NCAR), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Forecast Systems Laboratory (FSL) e inúmeras universidades. O modelo WRF foi concebido para ser uma ferramenta de simulação atmosférica flexível e eficiente em variadas plataformas de computação [24]. Para este estudo foi utilizada a versão 3.8 do modelo.

O modelo WRF possui um sistema de assimilação de dados com captação em três dimensões e pode ser configurado para resoluções espaciais da escala de metros até milhares de quilômetros. As principais parametrizações físicas deste modelo estão divididas em cinco categorias: microfísica, nuvens, camada limite planetária (CLP), modelos de uso do solo e parametrização de processos radiativos. Assim, a maior dificuldade para a execução do modelo consiste em selecionar um grupo de parametrizações que seja adequado às condições da região em estudo e à capacidade computacional disponível.

O modelo WRF também permite o aninhamento de grades de forma que refinar a resolução horizontal em áreas de maior interesse para o estudo de previsão.

D. Descrição das Simulações

Os modelos BRAMS e WRF foram configurados para simulações com um domínio com 5 km de resolução horizontal para a área apresentada na Fig. 1. As simulações foram realizadas para todo o ano de 2014. Para execução do modelo WRF, optou-se pelas as parametrizações que obtiveram os melhores resultados em trabalhos divulgados na literatura científica [9]:

- Parametrização de transferência radiativa em ondas longas: esquema RRTMG (*Rapid Radiative Transfer Method*) descrito em [25] e baseado no método “*Monte-Carlo independent column approximation*”;
- Parametrização transferência radiativa em ondas curtas: RRTM (*Rapid Radiative Transfer Method*) baseada no esquema disponível no modelo MM5 [26];
- Microfísica de nuvens: parametrização desenvolvida em [27] com o intuito de melhorar a previsão de eventos de congelamento para alertas de segurança na aviação;
- Parametrização de Cúmulos: esquema de Freitas descrito em [28] para aprimoramento da parametrização descrita em [29] e para uso em alta resolução;
- Modelo de solo-superfície: método Noah LSM (*Land Surface Model*) de quatro camadas, que inclui zona radicular, evapotranspiração, drenagem do solo e escoamento superficial, além de considerar categorias de vegetação, fração e textura do solo;
- Parametrização para camada limite atmosférica (CLP): esquema de Mellor-Yamada-Janjic descrito em [30], e que utiliza termos gradientes para representar fluxos devidos a gradientes não locais, adicionando um tratamento explícito de camada de entranhamento no topo da CLP.

A configuração do modelo BRAMS foi realizada da seguinte forma:

- Transferência radiativa em ondas longas e ondas curtas: CARMA [21] desenvolvida para parametrizar os processos radiativos envolvendo aerossóis emitidos em eventos de queima de biomassa;
- Microfísica de nuvens: segue o esquema descrito por Walko et al. [31] com prognóstico de 7 hidrometeoros;
- Convecção profunda: a parametrização do tipo GF descrita em [28], com fechamento ensemble;
- Convecção rasa: a parametrização descrita por [22];
- Parametrização para CLP: esquema de Mellor e Yamada, descrito em [32].

As simulações com os modelos de mesoescala devem atender uma resolução espacial compatível com os processos físicos na atmosfera. Neste sentido, adotou-se uma grade retangular, com 5 km de resolução horizontal e 50 níveis verticais. As condições iniciais e de contorno foram idênticas para ambos modelos, obtidas a partir das saídas do modelo global GFS (Global Forecast System) cedidas pelo NCEP (National Center for Environmental Prediction) com resolução espacial horizontal de 0.5° e resolução temporal de 6 horas.

As estimativas produzidas pelos modelos de mesoescala foram armazenadas em intervalos horários, sendo posteriormente calculadas as integrais diárias e as médias mensais das integrais diárias.

E. Análise Estatística

A confiabilidade de uma série de dados fornecida por modelos numéricos deve ser avaliada por meio de comparação com os dados observados. Em geral, esse processo de validação das estimativas de modelos está focado na avaliação do Erro Quadrático Médio (RMSE), e no desvio de viés ou bias, como mostra os estudos [33], [34], dentre outros. É importante ter em mente que a comparação no processo de validação é realizada entre saídas de modelos que representam uma estimativa média para uma área de 5 x 5 km com valores pontuais observados em uma estação automática localizada no interior dessa área.

O Viés (ou *bias* é, dentre as consideradas aqui, a mais simples medida de habilidade do modelo. O *bias* indica o erro sistemático, isto é, quanto o modelo subestima ou superestima as variáveis meteorológicas de interesse em relação aos seus valores observados em superfície. O valor de bias positivo significa que os dados modelados estão maiores que os valores observados em superfície, enquanto que, valores negativos indicam que o modelo fornece valores menores que os observados para as variáveis de estudo. O Viés pode assumir qualquer valor real e tem a mesma unidade da variável em análise. O viés é calculado por:

$$bias = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\phi_i - \phi_{0i}) \quad (1)$$

onde ϕ_i é o valor estimado pelo modelo para a variável de interesse no i -ésimo instante do tempo, ϕ_{0i} é o valor da mesma variável observada em estação meteorológica de superfície no mesmo instante de tempo, e N é o número de valores utilizados para comparação.

A raiz do Erro Quadrático Médio (*RMSE*) é dada pela soma dos quadrados das diferenças entre os resultados do modelo e observações de campo:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\phi_i - \phi_{0i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

O *RMSE* pode assumir qualquer valor positivo e tem a mesma unidade de medida da variável em estudo. Assim como o *bias*, quanto mais próximo do valor zero maior a confiabilidade das estimativas fornecidas pelo modelo.

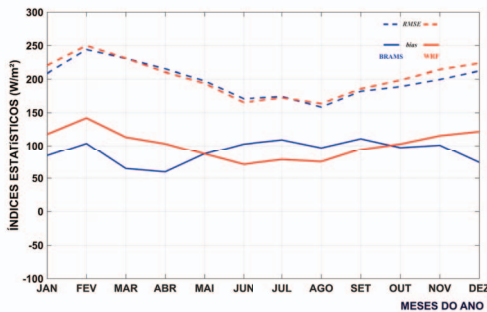
III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para comparar o desempenho global dos modelos, optou-se primeiramente por investigar seu padrão de comportamento ao longo do ciclo anual. A Fig.(2a) apresenta o ciclo anual dos desvios *bias* (eq. 1) e *RMSE* (eq. 2) calculados a partir das médias mensais de irradiância solar observadas em todas as estações automáticas usadas neste estudo. Observa-se que os desvios RMSE das estimativas produzidas por ambos os

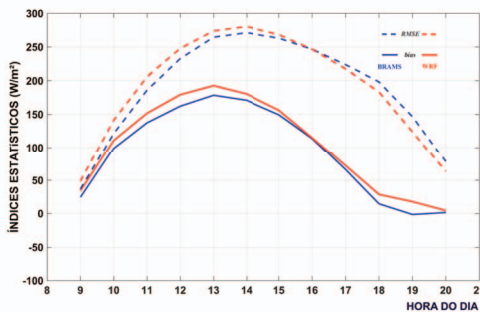
modelos são bastantes similares ao longo de todo o ano com diferenças da ordem de $15 W/m^2$ em alguns meses do ano. Por outro lado, o desvio bias da irradiância solar média mensal apresentaram valores maiores de até $50 W/m^2$. O modelo BRAMS apresentou menores valores de *bias* no início e fim do ano, mais especificamente, entre os meses de Janeiro a Abril e Novembro a Dezembro. Por outro lado, o WRF apresentou menores desvios *bias* entre os meses de Junho e Setembro. Os modelos apresentam desempenho semelhante nos meses de Maio e Outubro. Estes resultados mostram que o modelo BRAMS apresentou incertezas menores no período mais chuvoso da região NEB, enquanto as estimativas produzidas pelo WRF apresentaram menores desvios em meses primariamente secos quando acontece os maiores índices de irradiância solar na região de estudo.

A Fig.(2b) mostra os desvios estatísticos apresentados pelos valores médios de irradiância solar horária considerando todo o período de estudo e todas as estações de coleta de dados. Ambos os modelos apresentaram desempenhos semelhantes com diferenças menores que $15 W/m^2$ entre si, cerca de 3% da média de irradiação solar horária. Observa-se que os desvios são menores no início e fim do dia, quando a irradiância solar incidente na superfície é baixa.

No intuito de investigar a variabilidade espacial dos desvios de *bias* apresentados pelas estimativas dos dois modelos, colunas verticais proporcionais aos valores sazonais foram distribuídas geograficamente como mostra a Fig.3. Verifica-se a ocorrência de alguns padrões espaciais. O modelo BRAMS apresenta os menores desvios de *bias* para quase todo NEB

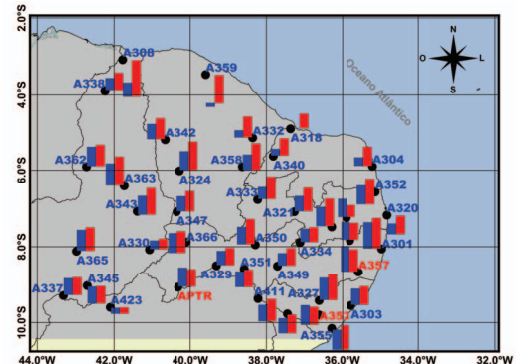


(a)

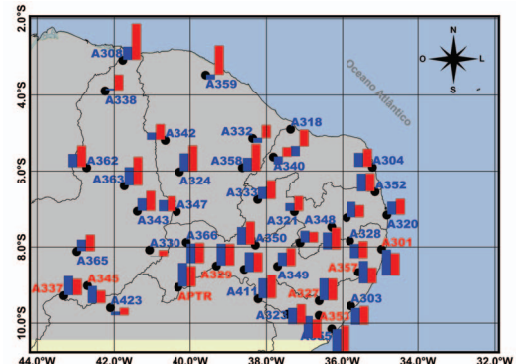


(b)

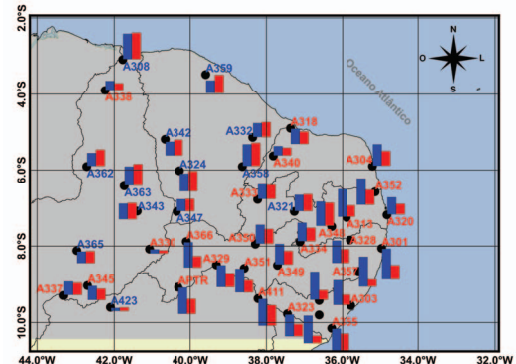
Fig. 2. Desvios de bias e RMSE nas estimativas de irradiância solar na superfície produzidas pelos modelos BRAMS e WRF em relação aos dados observados nas estações meteorológicas: (a) desvios das médias mensais; (b) desvios das médias horárias.



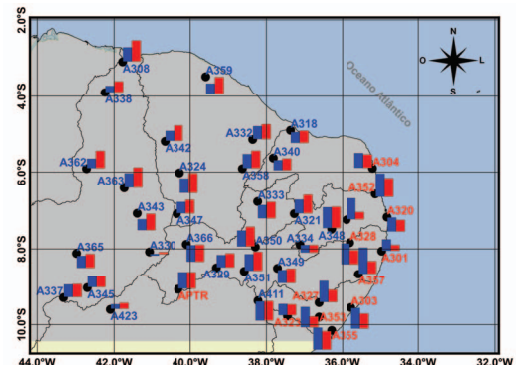
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3. Distribuição espacial do desvio de bias das estimativas dos modelos BRAMS (em azul) e WRF (em vermelho): resultados para o trimestre composto por (a) Dezembro a Fevereiro – DJF; (b) Março a Maio – MAM; (c) Junho a Agosto – JJA; e (d) Setembro a Novembro - SON.

no trimestre DJF (Dezembro, Janeiro e Fevereiro). A partir do trimestre MAM (Março, Abril, Maio), as incertezas das estimativas produzidas pelo modelo WRF tornam-se menores, principalmente para a região próxima à costa leste do NEB e gradativamente superam o desempenho do modelo BRAMS nas estações do localizadas no interior da área de estudo no trimestre seguinte. O BRAMS volta a apresentar desvios menores a partir do trimestre SON (Setembro a Novembro). Interessante notar que as estimativas do modelo BRAMS apresentam desvios *bias* menores na área localizada ao norte do NEB durante quase todo o ano, principalmente durante o verão no hemisfério Sul. Uma possível hipótese os desvios menores no período chuvoso está relacionada com o fato de que algumas parametrizações do modelo BRAMS foram desenvolvidas e especificamente adaptadas para as condições típicas dos processos meteorológicos encontradas no NEB.

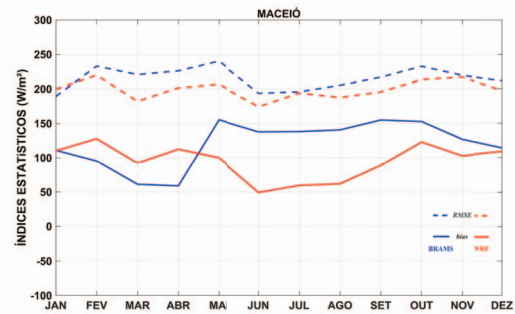
Para uma melhor caracterização das incertezas encontradas nas estimativas de irradiância solar, foram selecionadas seis estações meteorológicas automáticas como referência para uma análise estatística mais detalhada. O critério para a escolha foi a disponibilidade e qualidade dos dados medidos, além da distribuição espacial ao longo da região de estudo. Foram selecionadas seis estações de medição:

- na região costeira: Maceió (A303); Natal (A304) e Parnaíba (A308);
- na região continental: Caracol (A337); Campos Sales (A347) e Petrolina (APET).

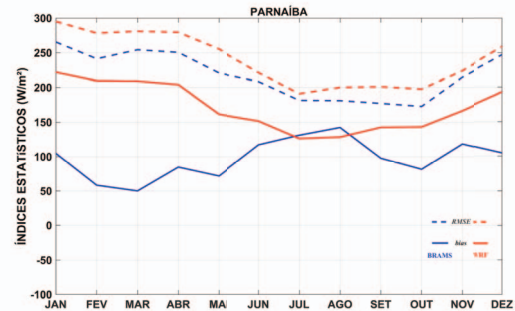
A Fig. 4 apresenta a evolução dos desvios para os valores médios mensais em 4 estações de referência. O ciclo anual em Natal(RN) é similar aos resultados obtidos em Macéio(Al), ambas localizadas na região costeira. O comportamento dos desvios em Caracol apresentou um ciclo anual similar ao observado em Petrolina.

A Fig.4 mostra que, em geral, as estimativas produzidas com o modelo BRAMS apresentam *bias* menor que aquelas fornecidas pelo modelo WRF no período chuvoso, entre dezembro e maio. Por outro lado, há uma inversão no período seco (maio a novembro) quando as médias mensais das estimativas fornecidas pelo WRF apresentam desvios de *bias* menores do que as estimativas do BRAMS. Esta inversão é menos evidente na estação localizada em Parnaíba onde os dois modelos produzem estimativas com desvios muito similares. Confirmando a análise anterior baseada em todo o conjunto de dados observados, não se verificou diferenças superiores a $30 W/m^2$ nos valores de *RMSE* em todas as localidades selecionadas como referência tanto no período seco quanto no período chuvoso.

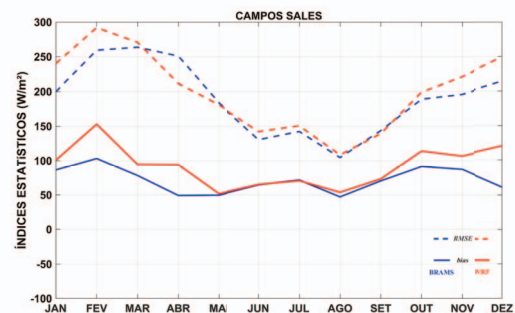
As análises do ciclo diário demonstram os comportamentos distintos em períodos chuvosos e secos e que podem ser acentuadas dependendo da localização geográfica das estações de referência. Para as localidades Natal e Maceió, na costa leste do NEB, os modelos apresentaram comportamento similar em termos do desvio de *bias*, com os menores desvios se alternando entre o BRAMS (meses de Março e Abril) e o WRF (meses de Junho e Julho). Por outro lado, em Parnaíba (no norte do NEB), o modelo BRAMS conseguiu simular o ciclo diário com desvios de *bias* menores durante o período chuvoso, mas os dois modelos foram equivalentes



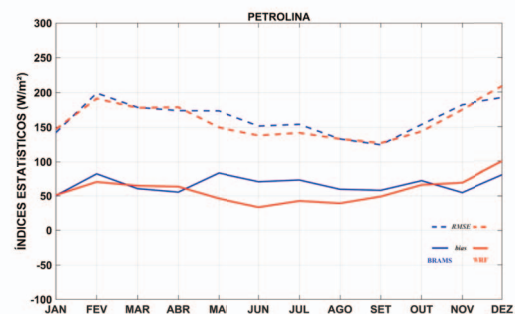
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4. Desvios de bias e RMSE das médias mensais de estimativas de irradiância solar horária fornecidas pelos modelos BRAMS e WRF para as seis estações de coleta de dados adotadas como referência neste estudo.

durante o período seco. Em Petrolina e Caracol (interior do NEB), observou-se um comportamento distinto em que os dois modelos apresentaram desvios muito próximos para o período chuvoso, mas o modelo WRF representou melhor o ciclo diário

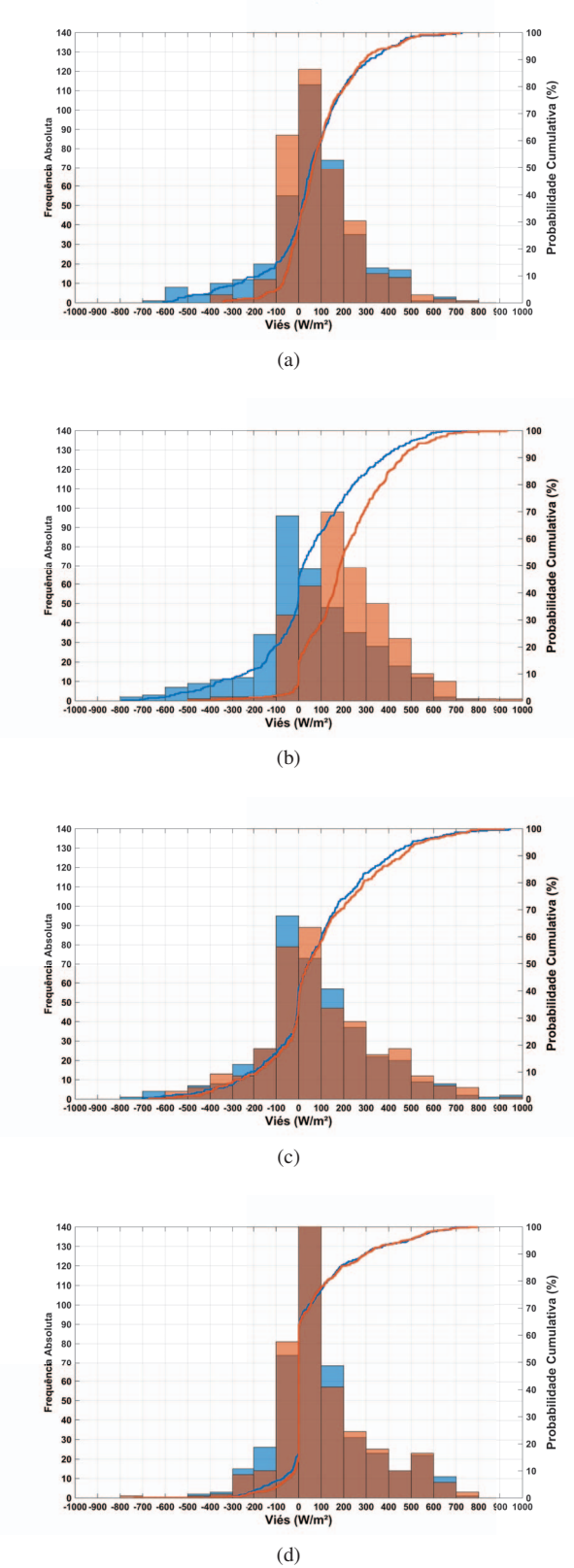


Fig. 5. Histograma e função de probabilidade acumulada dos valores dos desvios de bias entre as estimativas horárias fornecidas pelos modelos BRAMS (azul) e WRF (laranja) durante o período chuvoso nas estações de referência adotadas neste estudo. A cor marrom denota a sobreposição entre os histogramas em azul e laranja.

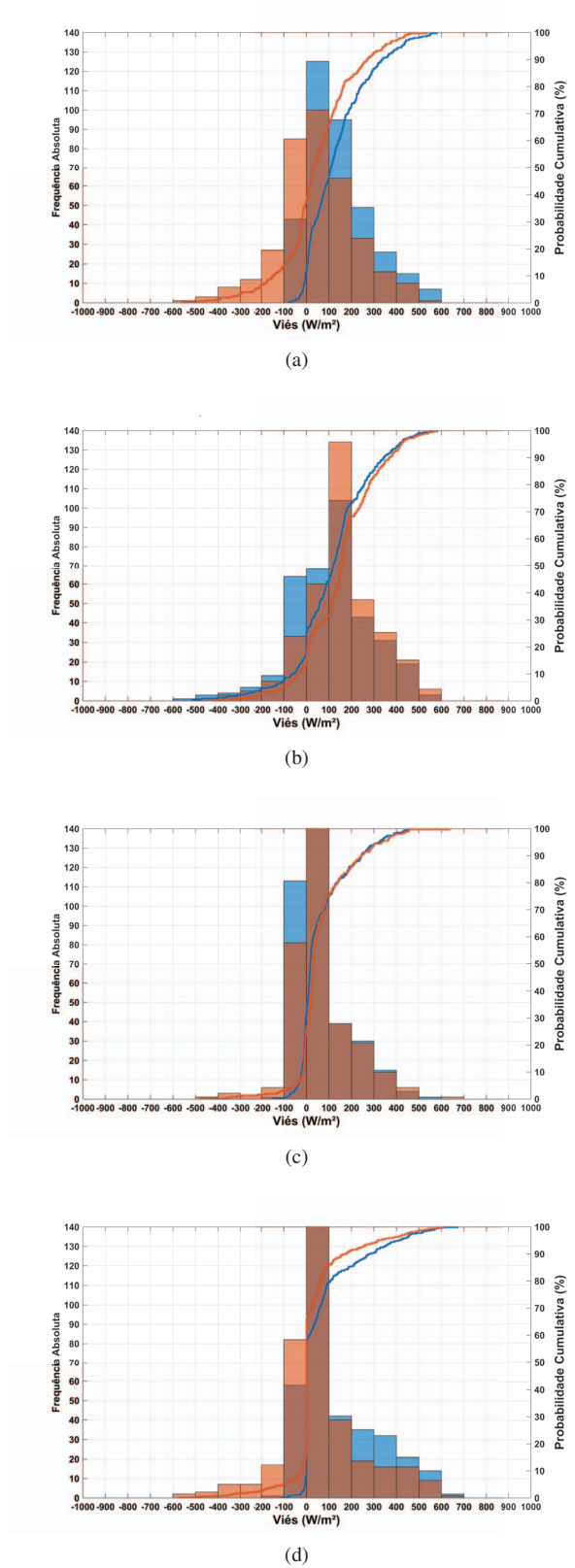


Fig. 6. Histograma e função de probabilidade acumulada dos valores dos desvios de bias entre as estimativas horárias fornecidas pelos modelos BRAMS (azul) e WRF (laranja) durante o período seco nas estações de referência adotadas neste estudo. A cor marrom denota a sobreposição entre os histogramas em azul e laranja.

durante o período seco.

As Figs. 5 e 6 mostram a distribuição de frequência e a curva de probabilidade acumulada dos desvios de *bias* das estimativas do BRAMS e WRF para as estações de referência nos períodos chuvoso e seco, respectivamente. A Fig. 5 mostra que o modelo WRF produz maior ocorrência de superestimativas que o modelo BRAMS durante o período chuvoso, principalmente em Parnaíba. Observou-se uma similaridade grande entre as distribuições de frequências de *bias* durante o período chuvoso no interior do NEB (Caracol, Campos Sales e Petrolina). A Fig. 6 indica que o modelo BRAMS produz maior número de superestimativas que o modelo WRF durante o período seco, exceção feita para a localidade de Parnaíba localizada ao norte da região de estudo. Nesta última localidade, a distribuição observada para os desvios *bias* das estimativas do BRAMS possui cerca de 30% de desvios com subestimativas da irradiância solar incidente na superfície.

IV. CONCLUSÃO

O presente trabalho contextualiza a importância sobre a disponibilidade de informações confiáveis sobre o potencial de energia solar no território brasileiro e destaca o esforço da comunidade científica para ampliar a base de dados disponível para apoio e suporte do setor elétrico do país. O estudo avalia as incertezas associadas às estimativas de irradiância solar incidente na superfície produzidas por dois modelos numéricos de mesoescala - o BRAMS e o WRF para o NEB que possui o maior potencial de energia solar do território brasileiro.

Os resultados obtidos no estudo indicam que, em geral, ambos modelos superestimam a média mensal da irradiância solar horária com desvio médio *bias* de aproximadamente 100 W/m^2 (cerca de 16%). As estimativas produzidas pelo modelo BRAMS apresentaram desvios *bias* menores nos períodos de Janeiro a Abril, Novembro e Dezembro, enquanto as estimativas produzidas pelo WRF apresentaram menores desvios entre Junho a Setembro. Nos meses de Maio e Outubro, os modelos apresentaram estimativas com desvios similares para a região de estudo. Para efeito de comparação os desvios médios nas estimativas diárias por modelos satelitais (diagnósticos) são inferiores a 10%, o que evidencia a dificuldade dos modelos atmosféricos prognósticos em estimar a posição e intensidade das nuvens nas diversas porções do território.

Com relação à simulação do ciclo diário, o desempenho dos modelos também foi semelhante, apresentando *bias* de até 200 W/m^2 (cerca de 19%) (vide Fig. 2) em torno do meio dia solar. O modelo BRAMS apresentou desempenho ligeiramente superior, com menor desvio de *bias*, principalmente no período da manhã. Quanto ao *RMSE*, os dois modelos apresentaram desempenho semelhante na escala mensal, com ligeira vantagem para o BRAMS no ciclo diário.

O estudo indica que a diferença de desempenho entre os modelos é tipicamente inferior a 5% quando se avalia a região do NEB como um todo. No entanto, comparações locais podem mostrar discrepâncias maiores refletindo em incertezas nas estimativas produzidas pelos modelos, como observamos nos mapas apresentados na Fig. 3. A espacialização do desvio de *bias* ao longo dos meses mostrou que o modelo BRAMS

apresenta um desempenho superior ao WRF na porção norte da área de estudo durante quase todo o ano. Entretanto, nota-se que o WRF superou o modelo BRAMS (menores desvios) durante os meses secos, principalmente na área costeira leste e na porção central da região de estudo.

A escolha de um destes modelos para avaliação ou previsão de recurso solar deve considerar inicialmente o desempenho de cada modelo na região de interesse, uma vez que os modelos podem apresentar diferenças nos valores de *bias* que podem ser decisivas para análise de desempenho do aproveitamento do recurso solar em questão. Para exemplificar o exposto, a Fig. 4 destaca os desvios *bias* bastante similares apresentados pelas estimativas dos dois modelos para Petrolina, e desvios bastante distintos durante o período chuvoso em Parnaíba.

Ainda, no que se refere ao desempenho para previsão, embora este trabalho não evidencie diferenças significativas no *RMSE* para o Nordeste Brasileiro, o mesmo não podemos afirmar para as demais regiões do país.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Meteorologia pela cessão dos dados meteorológicos, e ao CNPq pelo apoio financeiro dos autores. Os autores agradecem ao suporte institucional e financeiro da Petrobras, através dos projetos de P&D ANEEL PD-00553-0034/2016 e PD-00553-0042/2016 e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas (INCT-MC), através dos processos CNPq 573797/2008-0 e FAPESP 2008/57719-9.

REFERÊNCIAS

- [1] D. D. dos Santos Carstens and S. K. da Cunha, "Challenges and opportunities for the growth of solar photovoltaic energy in Brazil," pp. 396 – 404, 2019.
- [2] F. R. Martins and E. B. Pereira, "Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in Brazil," *Energy Policy*, vol. 39, no. 7, pp. 4378 – 4390, 2011, special Section: Renewable energy policy and development.
- [3] I. Souza Machado, B. Soares Moreira Cesar Borba, and R. Silva Maciel, "Modeling distributed PV market and its impacts on distribution system: A Brazilian case study," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 11, pp. 4520–4526, Nov 2016.
- [4] D. Vasconcellos de Sousa Stilpen and V. Cheng, "Solar photovoltaics in Brazil: A promising renewable energy market," in *2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, Dec 2015, pp. 1–5.
- [5] A. Bess Alcantara Amaral, A. L. Zambelli Loyola Gonzaga Mendonça, A. Araujo Martins Resende, and E. Eduardo Rego, "Solar energy and distributed generation: 2015, a year of inflection in Brazil?" *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 8, pp. 3731–3737, Aug 2016.
- [6] L. Willer Oliveira and T. Cristina Jose Maria, "Planning of renewable generation in distribution systems considering daily operating periods," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 5, pp. 901–907, May 2017.
- [7] E. B. Pereira, F. R. Martins, A. R. Gonçalves, R. S. Costa, F. J. L. de Lima, R. Rütther, S. L. de Abreu, G. M. Tiepolo, S. V. Pereira, and J. G. de Souza, *Atlas Brasileiro de Energia Solar*, 2nd ed., INPE, Ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017.
- [8] F. R. Martins, E. B. Pereira, S. A. Silva, S. L. Abreu, and S. Colle, "Solar energy scenarios in Brazil, Part one: Resource assessment," *Energy Policy*, vol. 36, no. 8, pp. 2843–2854, 2008.
- [9] F. J. L. Lima, F. R. Martins, E. B. Pereira, E. Lorenz, and D. Heinemann, "Forecast for surface solar irradiance at the Brazilian Northeastern region using NWP model and artificial neural networks," *Renewable Energy*, vol. 87, pp. 807–818, 2016.

- [10] P. E. D. da Silva, F. R. Martins, and E. B. Pereira, "Quality Control of Solar Radiation Data within SONDA Network in Brazil: Preliminary Results," in *EUROSUN 2014*, 2014.
- [11] F. R. Martins and E. B. Pereira, "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*, 2011.
- [12] F. R. Martins, R. Rütger, E. B. Pereira, and S. L. Abreu, "Solar energy scenarios in Brazil. Part two: Photovoltaics applications," *Energy Policy*, vol. 36, no. 8, pp. 2855–2867, 2008.
- [13] T. S. Viana, R. Rütger, F. R. Martins, and E. B. Pereira, "Assessing the potential of concentrating solar photovoltaic generation in Brazil with satellite-derived direct normal irradiation," *Solar Energy*, vol. 85, no. 3, pp. 486–495, 2011.
- [14] F. R. Martins, S. L. Abreu, and E. B. Pereira, "Scenarios for solar thermal energy applications in Brazil," *Energy Policy*, pp. 640–649, 2012.
- [15] M. T. Kayano and R. V. Andreoli, "Clima da região Nordeste do Brasil," in *Tempo e Clima no Brasil*, 1st ed., Off, Ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2009, ch. 14, p. 464.
- [16] L. C. B. Molion and S. d. O. Bernardo, "Uma Revisão da Dinâmica das Chuvas no Nordeste Brasileiro," *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2002.
- [17] I. F. A. Cavalcanti, N. J. Ferreira, M. A. F. d. S. Dias, and M. G. A. Justí, *Tempo e Clima no Brasil*, 1st ed., Oficina de Textos, Ed., São Paulo, 2009.
- [18] R. L. W. Tremback C.J., "The Regional Atmospheric Modeling System (RAMS): Development for parallel processing computer architectures." *3rd RAMS Users Workshop, Echucha, Vic., Australia, 10-12 July, 1997*.
- [19] S. R. Freitas, K. M. Longo, M. a. F. Silva Dias, R. Chatfield, P. Silva Dias, P. Artaxo, M. O. Andreae, G. Grell, L. F. Rodrigues, a. Fazenda, and J. Panetta, "The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) – Part 1: Model description and evaluation," *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 9, no. 8, pp. 2843–2861, 2009.
- [20] J. L. M. Freire, S. R. De Freitas, and C. A. D. S. Coelho, "Calibração do modelo regional BRAMS para a previsão de eventos climáticos extremos," *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 30, no. 2, pp. 158–170, 2015.
- [21] N. E. Rosário, K. M. Longo, S. R. Freitas, M. A. Yamasoe, and R. M. Fonseca, "Modeling the South American regional smoke plume: Aerosol optical depth variability and surface shortwave flux perturbation," *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 13, no. 6, pp. 2923–2938, 2013.
- [22] E. P. D. E. Souza, Z. F. Lopes, and T. L. Araujo, "Ênfase no ciclo diurno balanço de energia à superfície na Amazônia Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande-PB , Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), Fortaleza-CE ." Tech. Rep., 2009.
- [23] D. S. Moreira, S. R. Freitas, J. P. Bonatti, L. M. Mercado, N. M. É. Rosário, K. M. Longo, J. B. Miller, M. Gloor, and L. V. Gatti, "Coupling between the JULES land-surface scheme and the CCATT-BRAMS atmospheric chemistry model (JULES-CCATT-BRAMS1.0): Applications to numerical weather forecasting and the CO₂ budget in South America," *Geoscientific Model Development*, vol. 6, no. 4, pp. 1243–1259, 2013.
- [24] C. Skamarock, B. Klemp, J. Dudhia, O. Gill, D. Barker, G. Duda, X.-y. Huang, W. Wang, and G. Powers, "A Description of the Advanced Research WRF Version 3," National Center for Atmospheric Research, Tech. Rep., 2008.
- [25] M. J. Iacono, J. S. Delamere, E. J. Mlawer, M. W. Shephard, S. A. Clough, and W. D. Collins, "Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models," *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 113, no. 13, pp. 1–8, 2008.
- [26] E. J. Mlawer, S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, "Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 102, no. D14, pp. 16 663–16 682, 1997.
- [27] G. Thompson, P. R. Field, R. M. Rasmussen, and W. D. Hall, "Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization," *Monthly Weather Review*, vol. 136, no. 12, pp. 5095–5115, 2008.
- [28] G. A. Grell and S. R. Freitas, "A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling," *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 14, no. 10, pp. 5233–5250, 2014.
- [29] G. A. Grell and D. Dévényi, "A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques," *Geophysical Research Letters*, vol. 29, no. 14, pp. 38–1–38–4, 2002.
- [30] Z. I. Janjić, "The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes," *Monthly Weather Review*, vol. 122, no. 5, pp. 927–945, 1994.
- [31] R. L. Walko, W. R. Cotton, M. P. Meyers, and J. Y. Harrington, "New RAMS cloud microphysics parameterization part I: the single-moment scheme," *Atmospheric Research*, vol. 38, no. 1–4, pp. 29–62, 1995.
- [32] G. L. Mellor and T. Yamada, "Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems," *Reviews of Geophysics*, vol. 20, no. 4, pp. 851–875, 1982.
- [33] R. Perez, R. Seals, and A. Zelenka, "Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data," *Solar Energy*, vol. 60, no. 2, pp. 89–96, feb 1997.
- [34] C. Schillings, R. Meyer, and H. Mannstein, "Validation of a method for deriving high resolution direct normal irradiance from satellite data and application for the Arabian Peninsula," *Solar Energy*, vol. 76, no. 4, pp. 485–497, apr 2004.

André Rodrigues Gonçalves é mestre em Meteorologia pelo INPE. Atualmente atua como pesquisador-tecnologista vinculado ao Labren/INPE. Sua linha de pesquisa inclui instrumentação ambiental e meteorologia aplicada ao setor de energia com foco em variabilidade de recursos renováveis e impactos de cenários climáticos nos recursos energéticos.

Enio Bueno Pereira é Pesquisador CNPq nível 1 e coordena o Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (Labren/INPE). Doutor em Geociências pela W. M. Rice University (USA). Concentra suas atividades na área de Ciências do Sistema Terrestre com ênfase em recursos de energias renováveis, mudanças climáticas, sensoriamento remoto da atmosfera.

Fernando Ramos Martins é Docente da UNIFESP lotado no Instituto do Mar, campus Baixada Santista. Doutor em Geofísica Espacial pelo INPE e Pesquisador CNPq nível 2. Coordena o Programa de Pós-graduação Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia do Mar. Suas atividades de pesquisa estão focadas em modelagem numérica aplicada à recursos renováveis, mudanças climáticas, sensoriamento remoto.

Francisco José Lopes de Lima é Doutor em Meteorologia pelo INPE. Realizou pós-doutorado na UNIFESP e Universidade de Oldenburgo (Alemanha) em modelagem numérica e previsão de recursos energéticos renováveis. Atualmente ocupa uma posição de pós-doutor com atividades em modelagem computacional, física, meteorologia dinâmica.

Marcelo Pizzuti Pes é Doutor em Ciência do Sistema Terrestre pelo INPE com Pós-Doutorado na Leibniz Universität Hannover (Alemanha) e Universidade de Oldenburgo. Atua na coordenação da equipe de instrumentação da rede SONDA de coleta de dados operada pelo INPE. Sua linha de pesquisa possui foco em recurso eólico e fotovoltaico, mudanças climáticas, e sensoriamento remoto.

Rodrigo Santos Costa é doutor em Meteorologia pelo INPE. Atualmente é Pesquisador-tecnologista Pleno do Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (Labren/INPE). Sua linha de pesquisa está centrada em modelagem atmosférica aplicada à meteorologia da energia, climatologia, micrometeorologia e meteo-oceanografia.