



ISSN:1984-2295

# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: [www.ufpe.br/rbgfe](http://www.ufpe.br/rbgfe)



## **Avaliação das estimativas de irradiação solar do BRAMS e desenvolvimento de uma técnica estatística de pós-processamento para o Norte do Brasil**

Francisco José Lopes de Lima<sup>1</sup>, Rodrigo Santos Costa<sup>2</sup>, André Rodrigues Gonçalves<sup>3</sup>, Ana Paula Paes do Santos<sup>4</sup>, Fernando Ramos Martins<sup>5</sup>, Enio Bueno Pereira<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,6</sup>Pesquisador, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Av. Astronautas, 1758, Jd Granja, S. J. Campos - SP, Brasil. <sup>1</sup>E-mail: francisco.lopes.lima@gmail.com (autor correspondente). <sup>5</sup>Professor-Doutor, Universidade Federal de São Paulo, UNIFESP, Rua. Dr. Carvalho de Mendonça, 144. CEP: 11070-102, Santos/SP, Brasil.

Artigo recebido em 25/11/2016 e aceito em 29/01/2017

### **RESUMO**

Este trabalho propõe uma metodologia para obtenção de dados de irradiação solar incidente na superfície da região Norte do Brasil utilizando o modelo numérico regional de mesoescala BRAMS em conjunto com uma técnica de remoção de viés. Este tipo de solução se faz necessário em virtude dos erros sistemáticos inerentes às simulações, ocasionados, por exemplo, pela dificuldade na representação da variabilidade da cobertura de nuvens. A técnica estatística de remoção de viés foi desenvolvida utilizando dados observacionais de irradiação solar de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) operando na área de estudo ao longo do ano de 2009. Verificou-se que o modelo BRAMS é capaz de reproduzir satisfatoriamente os ciclos mensais e diários da irradiação solar, mas existe uma clara tendência de superestimar os valores em relação aos dados observados. A validação com dados de superfície mostrou que a técnica estatística de remoção do viés conseguiu reduzir significativamente estes erros, aproximando os valores simulados daqueles observados em superfície.

Palavras-chave: energia solar, irradiação solar, BRAMS.

## **Evaluation of solar irradiation estimates of the BRAMS and development of a statistical post-processing technique for Northern Brazil**

### **ABSTRACT**

This study presents a methodology to get surface incoming solar irradiation at the Brazilian Northern region by using the regional mesoscale model BRAMS together with a statistical correction for bias removal. This methodology is required to get solar irradiation forecasts due to the systematic errors in solar data provided by numerical simulations related to the cloud variability. The statistical technique proposed for bias removal was developed using observational data acquired at automated weather stations of operated by the Brazilian Institute of Meteorology (INMET) in the study area for the whole year of 2009. The results showed that BRAMS model can simulate monthly and daily cycles of solar radiation satisfactorily, but there is a clear tendency to overestimate values when compared to the observational data. Validations from surface data showed that this statistical technique can significantly reduce these errors, approaching the simulated values to those observed in surface.

Keywords: Solar Energy, Solar Irradiation, BRAMS.

### **Introdução**

Nas últimas décadas, o mundo tem vivido diversas crises energéticas, provocadas por questões distintas, desde flutuações no preço do

petróleo, instabilidades provocadas pela desregulamentação dos mercados de eletricidade nos anos 1990, aliadas às pressões ambientais por redução nas emissões de gases de efeito estufa. O aumento no consumo mundial de energia também

tem contribuído para elevação de preços dos diversos setores da matriz energética e é inegável que fontes alternativas de energia vêm assumindo um papel crescente no cenário mundial, devido ao forte cunho sócio ambiental que estas asseguram e no Brasil esta realidade é crescente.

De acordo com o Balanço Energético Nacional 2015, a matriz de geração de energia elétrica Brasileira é pouco diversificada (ANEEL, 2015). Apesar de ser considerada limpa, ela é altamente dependente da fonte hidráulica, com cerca de 65% do total. Em termos de segurança energética, é importante buscar alternativas que possibilitem diminuir a alta dependência das hidrelétricas, pois sua vulnerabilidade às condições climáticas implica em uma constante preocupação, podendo levar a situações de racionamento e conflitos relacionados ao uso do recurso. A demanda de diversificar e reduzir esta enorme dependência aliada à necessidade de redução do uso de combustíveis fósseis tem aumentado a busca de geração de energia elétrica por fontes renováveis, em consonância com políticas internacionais de meio ambiente. No caso do Brasil, existem ainda os compromissos assumidos em acordos internacionais pelo Governo Federal, para a redução na emissão de gases do efeito estufa. Ou seja, a busca por fontes renováveis de energia tem aumentado consideravelmente em todo o mundo e podem-se destacar as fontes eólica e solar, dentre as que possuem maior inserção atualmente.

O Brasil, por situar-se na região tropical, recebe grande incidência de radiação solar durante todo o ano ao longo de seu território e sua localização também resulta em uma menor variabilidade interanual (Pereira et al., 2006; Martins et al., 2008a). Viana et al. (2011), Martins et al. (2011) e Tiepolo (2015), afirmam que usinas de energia fotovoltaicas (PV) poderiam ser rentáveis em todo o Brasil. Como exemplos de exploração viável dos recursos solares pode-se citar as aplicações como PV centrais e usinas de energia solar concentrada (CSP), com foco na zona árida da região Nordeste, e ligadas à rede de micro e mini geração de energia elétrica nos municípios (Martins et al., 2008b; Martins et al., 2012).

Apesar do recurso solar abundante e o alto valor que pode ser atribuído à grade com sistemas PV conectada em áreas comerciais dos grandes centros urbanos no Brasil, a capacidade instalada ainda é pequena frente ao potencial verificado.

Leilões de energia solar estão sendo realizados a fim de aumentar a quota de energia

solar na matriz energética nacional e estimular o setor de energia para investir e desenvolver projetos de aplicação desta fonte. Atualmente, várias empresas estão avaliando a viabilidade econômica e o planejamento para operar as usinas de energia solar (PV, concentrada PV e CSP) nas regiões brasileiras.

Para contribuir com este esforço, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e várias universidades estão trabalhando para fornecer dados científicos confiáveis sobre a quantificação do potencial de energia solar e a variabilidade espacial e temporal do recurso. No ano de 2006, o INPE lançou o Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira et al., 2006) e atualmente está em fase de preparação e edição da nova versão do atlas, com a análise de 17 anos de dados de satélite e a geração de uma base robusta de irradiação solar gerada através de simulações do modelo BRASIL-SR. O modelo sofreu uma série de melhorias, desde os dados climatológicos de entrada a uma melhor caracterização dos aerossóis atmosféricos, em especial aqueles oriundos da queima de biomassa na estação seca.

Com o crescimento da utilização da energia solar no mundo e no Brasil, novas tecnologias de geradores e topologias para as usinas solar têm sido criadas, a fim de melhorar o aproveitamento da energia solar e sua transmissão. Modelos numéricos de previsão de tempo são amplamente usados nos centros meteorológicos e encontram uma gama de aplicações em agricultura, recursos hídricos, turismo, etc. Forçada por 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, e.g. o RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) descrito em Cotton et al. (2002), 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 a previsão de tempo, até a medição de dispersão de poluentes. Entre estes, tem-se o modelo BRAMS - *Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System* (Freitas et al., 2009). Desenvolvido a partir do RAMS, a estrutura básica do modelo é descrita por Pielke et al. (1992), Cotton et al. (2002) e Pielke et al.

(2013). Uma descrição mais sucinta pode ser encontrada em Cavalcanti (2001).

O modelo BRAMS foi desenvolvido com o objetivo de criar e aprimorar novos esquemas de parametrizações voltadas para a região tropical e subtropical do Brasil. Possui um completo e sofisticado conjunto de parametrizações físicas para simular os processos governantes da evolução do estado atmosférico incluídas no seu código. Em sua versão mais recente, o BRAMS conta com atualizações importantes, como a incorporação do modelo de superfície *Joint UK Land Environment Simulation* (JULES) descrito em Moreira et al. (2013) e uma nova parametrização de convecção adequada para as escalas cinzas e acoplada com aerossóis desenvolvida por Grell e Freitas (2014). Descrições detalhadas podem ser encontradas em Freire et al. (2015).

Os modelos numéricos possuem, em geral, um erro sistemático ou viés, na quantificação de radiação solar incidente na superfície. Técnicas estatísticas para a redução destes erros são necessárias para diversas aplicações, sendo esta uma das principais motivações deste estudo. Desta forma, o objetivo deste trabalho é a avaliação do uso de modelos de mesoescala no diagnóstico da irradiação solar e dos possíveis ajustes para remoção de viés. Em especial, avaliar a capacidade do modelo numérico BRAMS em simular os campos de

irradiação solar e, conseqüentemente, seu posterior uso na quantificação de potencial solar. Também é objetivo deste estudo o desenvolvimento e a avaliação de técnicas de correção estatística espacial para a remoção do erro sistemático do modelo. A região de estudo será a Amazônia Oriental, compreendendo os Estados do Amapá e Pará, onde também pode ser avaliada ainda como a variação de nebulosidade interfere na incidência da radiação na região, uma vez que este tipo de estimativa ainda é bastante incipiente.

Para tal serão realizadas simulações durante todo o ano de 2009, e submetidas ao ajuste estatístico oriundo dos dados de sete estações meteorológicas de superfície para posterior avaliação das melhorias obtidas.

### Material e métodos

Os dados de superfície utilizados neste trabalho são compostos por observações horárias de irradiação solar coletada em sete estações meteorológicas de superfície operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e localizadas na Amazônia Oriental (nos estados do Amapá e do Pará - Brasil). As informações das estações, incluindo suas respectivas coordenadas geográficas (latitude, longitude) e a altitude são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Relação das estações de superfície do INMET com dados horários de radiação solar na Amazônia Oriental (Amapá e Pará - Brasil).

Local	ID	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Belém - PA	A201	-1,41°	-48,44°	24
Castanhal - PA	A202	-1,30°	-47,93°	65
Tomé Açu - PA	A213	-2,60°	-48,37°	38
Soure - PA	A227	-0,81°	-48,52°	11
Cametá - PA	A236	-2,25°	-49,49°	22
Oiapoque - AP	A242	3,81°	-51,86°	21
Tartarugalzinho - AP	A243	1,50°	-50,92°	21

Dentre os dados observados, optou-se por escolher o ano de 2009 pelo fato deste ter apresentado, de modo geral, aspectos climáticos dentro dos padrões de normalidade para a região em estudo, segundo dados do NCEP/NCAR, o qual utiliza base climatológica compreendida entre os anos de 1981 a 2010. A escolha de cada estação buscou atender ao menos um critério de relevância para o estudo, como por exemplo: Belém e Castanhal, por estar no litoral; Soure por

estar isolada na Ilha do Marajó e desagregada ao sistema energético nacional, (o que deixa o local sem energia convencional, somente dependente de geradores a diesel) dentre outros. A partir dos dados de irradiação solar foram obtidas as integrais diárias e as médias mensais e sazonais da irradiação solar para comparação com os dados estimados pelo modelo de mesoescala.

O modelo de mesoescala foi o BRAMS, em sua versão 5.2. As parametrizações de

radiação foram propostas por Longo et al. (2006) e Rosário et al. (2013) com tratamento explícito de água condensada e aerossóis; a parametrização de convecção rasa foi descrita por Souza (1999) e existe uma adicional parametrização introduzida por Freitas et al. (2009) e descrita por Grell e Dévényi (2002). A turbulência na camada limite planetária é calculada segundo Mellor e Yamada (1982) e a microfísica segue o esquema descrito por Walko et al. (1995a).

As condições iniciais e de contorno do BRAMS foram obtidas a partir de dados de reanálises do ERA-INTERIM, com resolução horizontal de  $0,125^\circ \times 0,125^\circ$  (aproximadamente 14 km), para todo o ano de 2009. Foram utilizados dados de altura geopotencial, temperatura do ar, componentes meridional e zonal do vento e umidade relativa para iniciar o modelo, e também

como condições de contorno, com atualização a cada 6 horas.

Para este tipo de uso, 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 222 pontos na direção y) e 38 níveis verticais; esta área cobre a região de interesse.

As frequências das análises feitas pelo modelo foram padronizadas para intervalos horários, sendo posteriormente calculadas as integrais diárias e as médias mensais e sazonais das integrais diárias. A grade apresenta projeção polar-estereográfica e sua área útil é apresentada na Figura 1.

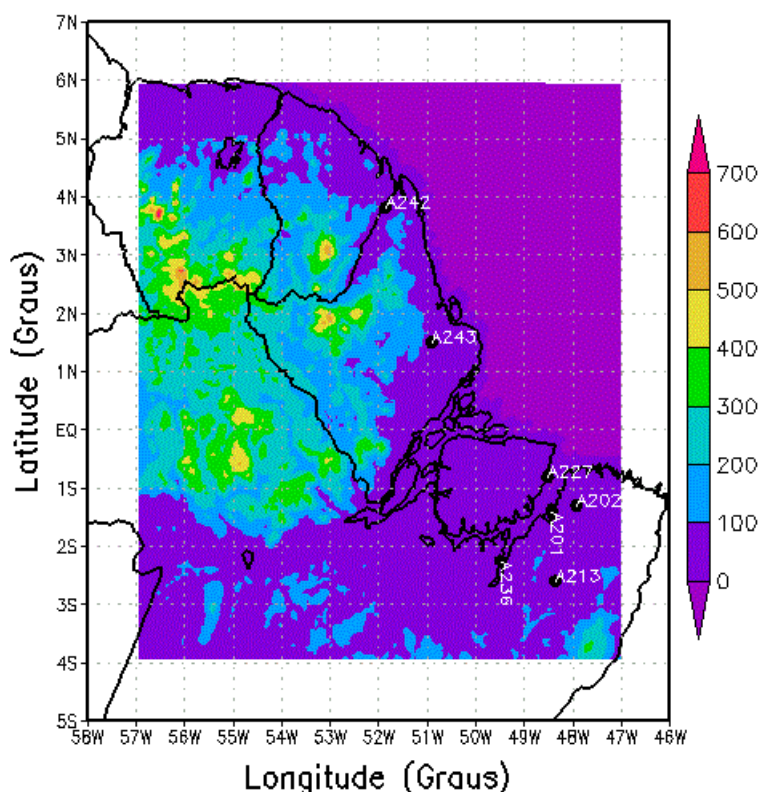


Figura 1. Mapa do domínio do modelo e topografia (m). Grade utilizada: 222 x 222 pontos. Área útil para análise: área colorida.

As simulações do modelo BRAMS para o ano de 2009 foram realizadas com a sua inicialização às 1800 UTC do dia 31 de dezembro de 2008, estendendo-se até 31 de janeiro de 2009; e assim por diante, para cada um dos meses do ano de 2009. As primeiras 6 horas de simulações de cada mês foram consideradas como “*spin-up*” e excluídas das avaliações. Tratando

especificamente das parametrizações utilizadas, foram escolhidos o esquema do tipo CARMA para a radiação, descrito em Longo et al. (2006); a microfísica de nuvens é resolvida pelo esquema descrito por Walko et al. (1995a); na convecção profunda, foi utilizado o esquema de Grell-Freitas (Grell e Freitas, 2014), com fechamento *Grell*; para a convecção rasa, o esquema descrito por

Souza (1999); e para a difusão turbulenta, foi escolhido o esquema de Mellor-Yamada (Mellor e Yamada, 1982).

Para a remoção do erro sistemático dos dados obtidos pelas simulações, foi utilizado um método estatístico, adaptado de Feddersen et al. (1999) e Wood et al. (2002) e amplamente usado em Camelo (2007) e Lima et al. (2012), que se baseia na utilização da média e do desvio padrão das séries observadas e simuladas dada como:

$$\phi_{ci} = \left( \phi_i - \bar{\phi}_i \right) \frac{\sigma_o}{\sigma_i} + \bar{\phi}_o \quad (1)$$

em que,  $\phi_i$  representa um valor da simulação,  $\bar{\phi}_i$  a média dos valores simulados,  $\sigma_o$  será a média dos desvios padrão das séries observadas,  $\sigma_i$ , média dos desvios padrão das séries simuladas, e por fim,  $\bar{\phi}_o$  representa a média dos dados observacionais. Para efeito de validação das estimativas, duas das estações meteorológicas utilizadas neste estudo serão retiradas do cálculo dos ajustes e separadas como conjunto de teste, sendo estas as estações de Belém-PA (A201) e Tartarugalzinho-AP (A243). A Tabela 2 mostra as médias e os desvios padrão das estações meteorológicas para o período.

Tabela 2. Média e desvio padrão das estações de superfície do INMET na Amazônia Oriental (Amapá e parte do Pará - Brasil) utilizadas na técnica estatística de correção espacial do modelo.

Estações	Média	Desvio padrão
A202	4,60	0,56
A213	4,90	0,64
A227	5,38	0,95
A236	5,53	0,72
A242	4,45	0,92
Média geral	4,97	0,75

Substituindo a média geral dos desvios e da média de cada uma das localidades na Equação 1, teremos a Equação 2 que pode ser aplicada espacialmente. Maiores detalhes sobre o método de correção aqui utilizado poderão ser encontrados em Reis Junior et al. (2006), Feddersen et al. (1999), Wood et al. (2002), Camelo (2007) e Lima et al. (2012).

$$\phi_{ci} = \left( \phi_i - \bar{\phi}_i \right) \frac{0,75}{\sigma_i} + 4,97 \quad (2)$$

Através dos estudos de Weber et al. (1982), Maria et al. (2008), Cunha (2008) e Lima et al. (2016), conclui-se que a melhor forma de se avaliar um modelo é utilizando-se um conjunto de índices estatísticos, de forma que possam ser minimizados os erros de interpretação. Por essa razão, é utilizado neste trabalho um conjunto de 3 índices estatísticos: o Erro Médio (EM), ou (Viés), o Erro Quadrático Médio (EQM) e o Coeficiente de Correlação (r). O Erro Médio (EM) é dado por:

$$EM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\phi_i - \phi_o) \quad (3)$$

O EM é, dentre as consideradas aqui, é a mais simples e menos representativa da medida de habilidade do modelo em simulação. Ele indica o erro sistemático, ou seja, subestimação ou superestimação do modelo em relação aos dados observados.

O Erro Quadrático Médio (EQM) é dado pela soma dos quadrados das diferenças entre os resultados do modelo e observações:

$$EQM = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_o)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

Pode assumir qualquer valor positivo e tem a mesma unidade de medida das séries. É maior a semelhança entre as séries simuladas e observadas quanto mais próximo de zero for à medida do erro. Já o coeficiente de correlação (r) permite uma interpretação relação linear entre observações e simulações e é definido por:

$$r = \frac{\sum (\phi_i - \bar{\phi}_i) (\phi_o - \bar{\phi}_o)}{\sqrt{\left[ \sum (\phi_i - \bar{\phi}_i)^2 \right] \left[ \sum (\phi_o - \bar{\phi}_o)^2 \right]}} \quad (5)$$

Havendo uma relação de linearidade, valores de  $r$  próximo a 1,0 (um), pode-se concluir que o método de simulação é capaz de representar a variabilidade temporal observada nos dados de irradiação solar observados nas estações meteorológicas.

## Resultados e discussão

A variabilidade da irradiação solar no Norte 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 Norte 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 e Bernardo, 2002; Cavalcanti et al., 2009).

As mudanças no comportamento da circulação geral da atmosfera ao longo do ano provocam significativas variações sazonais 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 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.

Para investigar o comportamento espacial da irradiação solar média para o período, os meses do ano foram classificados em quatro estações, de modo que o período de dezembro a fevereiro refere-se ao Verão, de março a maio ao Outono, de junho a agosto ao Inverno e de setembro a novembro refere-se à Primavera. Na Figura 2 têm-se os mapas das médias mensais da integral diária da irradiação solar, para a região em estudo

considerado as estações do ano. Nas Figuras 2(A), 2(C), 2(E) e 2(G) são apresentados os mapas para o modelo BRAMS, sem correção estatística para o Verão, Outono, Inverno e Primavera, respectivamente. Nas Figuras 2(B), 2(D), 2(F) e 2(H) são mostrados os mapas de irradiação solar simulado com o BRAMS, com a mencionada correção estatística para o Verão, Outono, Inverno e Primavera, respectivamente.

Observa-se que a região Norte recebe menor incidência de radiação solar durante o verão (Figura 2(A) e 2 (B)), apesar de sua localização próxima à linha do Equador.

Durante os meses de Primavera (Figuras 2(G) e 2(H)), ocorre o inverso e a região amazônica recebe maior irradiação solar global. Isto é coerente com as características climáticas da região e está de acordo com diversos estudos encontrados na literatura, já que se observa uma maior fração de cobertura de nuvens e precipitação elevadas durante o verão devido à forte influência da Zona de Convergência Intertropical ZCIT, linhas de instabilidade (Cohen et al., 1989) e aglomerados convectivos (Molion, 1987).

O decréscimo natural da incidência de radiação solar no topo da atmosfera que ocorre no Inverno em decorrência de fatores astronômicos associados ao sistema Sol-Terra é compensado na região amazônica por uma menor nebulosidade associada ao deslocamento da ZCIT em direção ao hemisfério norte. As menores incidências de irradiação solar são observadas sobre o sudoeste da região em estudo durante a maior parte do ano, o que pode ser devido a influência de fenômenos meteorológicos como a ZCIT e aglomerados convectivos associados à atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS.

Os trimestres DJF e MAM caracterizam o período com menores incidências de irradiação solar, coincidindo com o ápice da atividade convectiva na região associada à atuação direta da ZCIT, que atinge maior intensidade no trimestre de MAM (Nobre e Shukla, 1996). Este é também o período mais chuvoso na região, quando a irradiação solar atinge médias trimestrais variando entre 4,00 e 5,50 kWh/m<sup>2</sup> para o modelo corrigido, e entre 4,00 e acima de 6,50, para as saídas originais do modelo. Observa-se semelhanças nos padrões espaciais entre os dados simulados e os dados corrigidos, entretanto os dados originais do modelo tendem a superestimar os valores de irradiação diária.

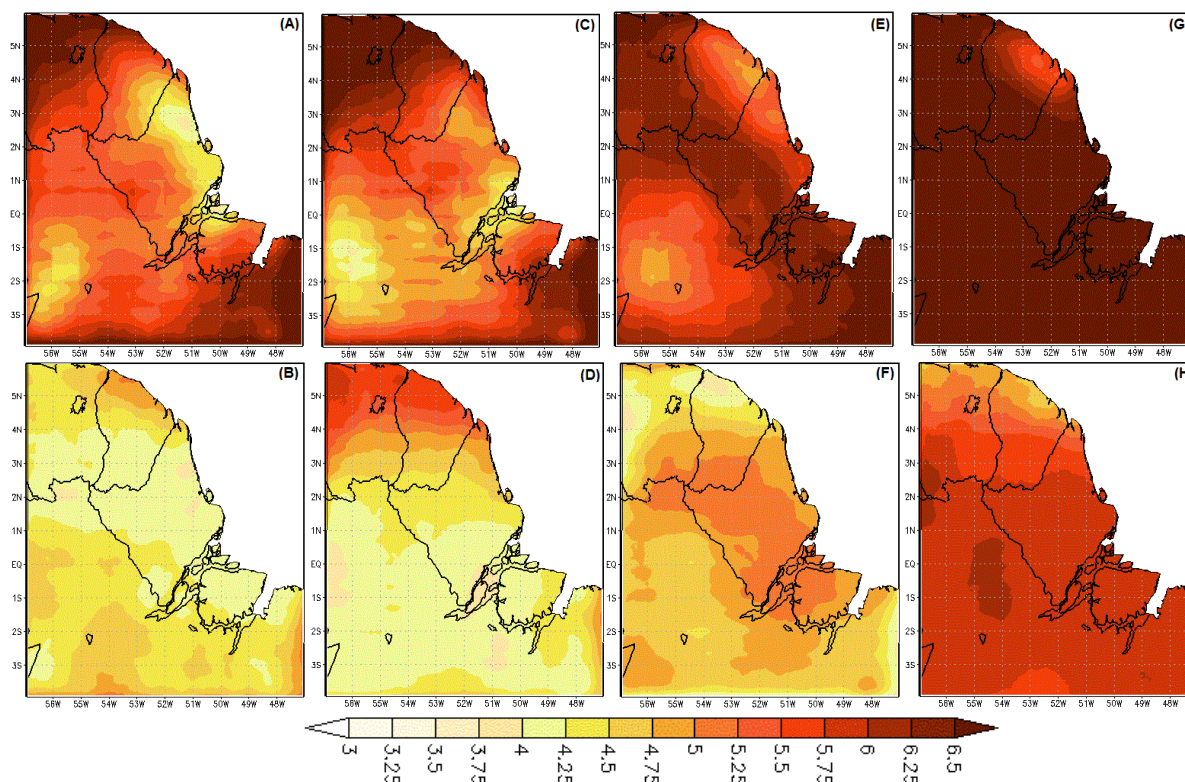


Figura 2. Mapas climatológicos da Irradiação Solar, médias mensais das integrais diárias, (kWh/m<sup>2</sup>), para os trimestres do ano de 2009 (A) JAN-FEV (verão), modelo BRAMS, (B) JAN-FEV (verão), modelo BRAMS, com correção estatística, (C) MAR-ABR-MAI (outono), modelo BRAMS, (D) MAR-ABR-MAI (outono), modelo BRAMS, com correção estatística, (E) JUN-JUN-AGO (inverno), modelo BRAMS, (F) JUN-JUN-AGO (inverno), modelo BRAMS, com correção estatística, (G) SET-OUT-NOV (primavera), modelo BRAMS, (H) SET-OUT-NOV (primavera), modelo BRAMS, com correção estatística.

Para a avaliação das estimativas de irradiação solar fornecidas pelo modelo BRAMS, são apresentados os índices estatísticos das equações 3, 4 e 5, com e sem a correção estatística, sendo quantificados o *EM*, *EQM* e *r*.

Nas Figuras 3 e 4 são apresentados os diagramas de dispersão para as estações em estudo, em que as estimativas (ordenadas) são comparadas com as observações (abscissas) de irradiação solar. Em todos os diagramas apresentados aqui, o comportamento geral das estimativas (*E*) dos modelos, em função das observações (*O*), é descrito por ajustes lineares ( $E = a + b.O$ ) calculados com base em todos os pontos e representados por linhas vermelhas. Os coeficientes lineares (*a*) e angulares (*b*), bem como os coeficientes de correlação, *EM* e o *EQM*, calculados para o ajuste linear são apresentados nos cantos superiores esquerdos de cada diagrama

de dispersão. As linhas azuis e vermelhas são diagonais, que passam pelas origens dos gráficos e possuem coeficientes angulares unitários, representando os casos ideais; isto é, elas representam os casos em que previsões seriam perfeitas, assumindo o mesmo valor das observações ( $P = O$ ). Nos diagramas dos gráficos lineares e de dispersão são mostradas as médias mensais dos totais diários para todos os meses do ano de 2009.

Como já mencionado, as estações de Belém e Tartarugalzinho serão utilizadas para a validação da técnica estatística de remoção do viés. Nas figuras abaixo podem ser vistos os índices estatísticos para todas as estações em estudo e observa-se que, apesar do BRAMS apresentar um alto viés em algumas estações, o modelo foi capaz de prever o comportamento da irradiação solar de forma satisfatória.

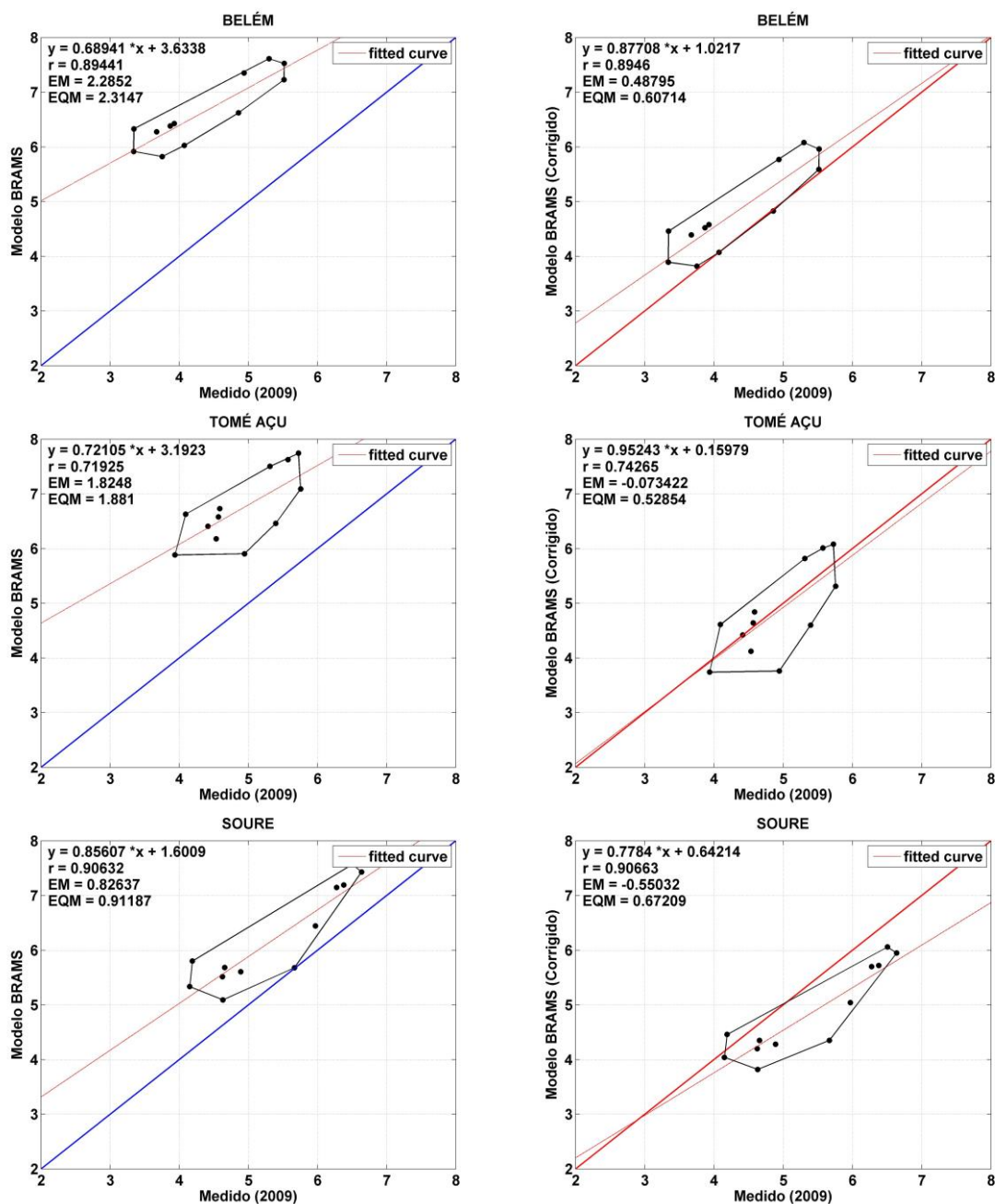


Figura 3. Diagrama de dispersão (média mensal das integrais diárias), durante o ano de 2009, modelo BRAMS (linha azul) e modelo BRAMS, com correção estatística, (linha vermelha), para as estações de Belém (A201), Tomé Açu (A213) e Soure (A227), exceto para a estação de Castanhã (A202) onde não obtivemos uma série longa de dados observados.

A Figura 3 mostra que o desempenho das simulações com o BRAMS usando a correção estatística apresentou uma melhora significativa em relação ao modelo original, com uma redução considerável no EM e EQM em todas as estações, em especial na estação de Belém, onde se obteve redução de 2,28 kW/m<sup>2</sup> para 0,89 kW/m<sup>2</sup> de EM e 2,31 kW/m<sup>2</sup> para 0,61 kW/m<sup>2</sup> de EQM. Entretanto, não houve melhora significativa nos coeficientes de correlação, o que já é esperado pelo fato de que a técnica estatística utilizada

apenas remove o viés do modelo, ou seja, o erro sistemático, e não altera a tendência do modelo em seguir os dados observacionais.

Estes resultados apresentam uma grande contribuição para as simulações do modelo BRAMS, visto que este já representava de maneira satisfatória o comportamento da irradiação solar no Norte do Brasil, necessitando apenas de uma técnica simples de remoção do viés para melhorar seus índices estatísticos. Observa-se novamente na Figura 4 que o



desempenho das simulações com o BRAMS usando a correção estatística apresentou uma melhora significativa. Os resultados mostram uma redução nos índices estatísticos em todas as estações, em especial na estação de

Tartarugalzinho, onde se obteve uma redução de 1.0 kW/m<sup>2</sup> para 0,23 kW/m<sup>2</sup> de EM e 1,1 kW/m<sup>2</sup> para 0,31 kW/m<sup>2</sup> de EQM. Como esperado, não houve melhora significativa no coeficiente de correlação.

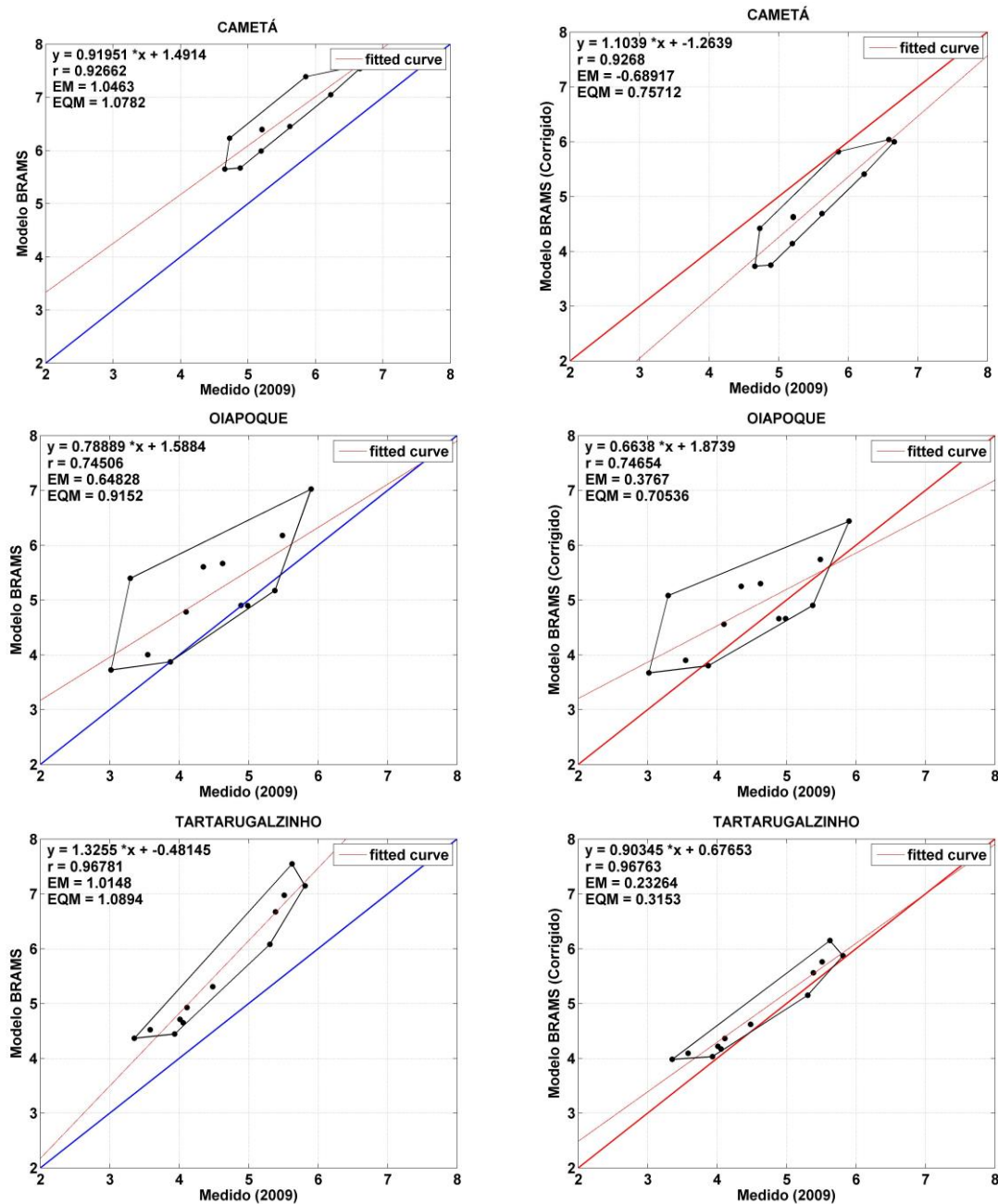


Figura 4. Diagrama de dispersão (média mensal das integrais diárias), durante o ano de 2009, modelo BRAMS (linha azul) e modelo BRAMS, com correção estatística, (linha vermelha), para as estações de Cametá (A236), Oiaipoque (A242) e Tartarugalzinho (A243).

Na Figura 5 são mostradas as séries das médias mensais das integrais diárias de irradiação solar. A figura apresenta uma comparação entre os dados observados e os dados simulados pelo modelo BRAMS, nas localidades onde estão as

estações meteorológicas. Pode-se observar que o modelo consegue seguir a tendência dos dados observados de forma satisfatória, enquanto que a correção estatística do modelo apenas remove o viés, sem fazer qualquer alteração na tendência

original do modelo. Um foco especial foi dado nas estações de Belém e Tartarugalzinho, (estações tomadas como conjunto de teste para a validação

do ajuste estatístico) onde verifica-se que o modelo consegue seguir a sazonalidade dos dados medidos e houve uma redução quase total do viés.

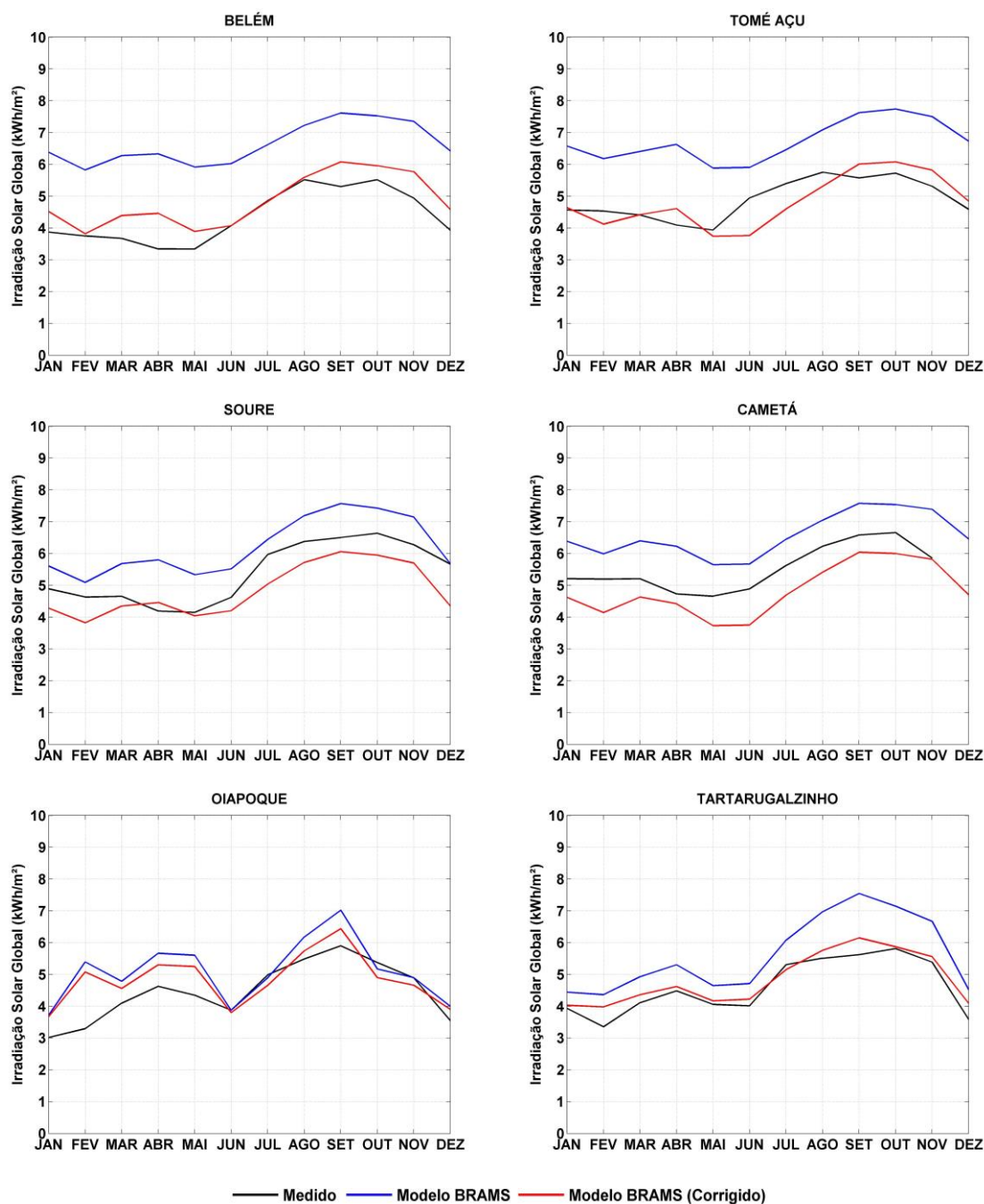


Figura 5. Comparação da irradiação solar ( $\text{kWh/m}^2$ ), média mensal das integrais diárias, durante o ano de 2009, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados pelo modelo BRAMS (linha azul) e os dados simulados pelo modelo BRAMS, com correção estatística, (linha vermelha), para as estações de Belém (A201), Tomé Açú (A213), Soure (A227), Cametá (A236), Oiaopoque (A242) e Tartarugalzinho (A243). Exceto para a estação de Castanhal (A202) onde não obtivemos uma serie longa de dados observados.

De maneira geral, o modelo superestima a série em relação aos dados observados, enquanto que a correção aplicada faz com que as estimativas cheguem até a subestimar em meses específicos em algumas localidades. Em Tomé

Açu, o modelo corrigido subestimou nos meses de maio a agosto, e em Soure e Cametá (onde só foram registrados dados observados entre os meses de janeiro e novembro) em quase todo o ano. Já em Belém e Tartarugalzinho, o modelo

obteve valores próximos aos observados. O comportamento geral da correção aplicada é o de transladar as simulações de irradiação solar, aproximando-a aos valores medidos em superfície, não alterando, no entanto, o perfil da série temporal.

Visando realizar uma breve análise do desempenho do modelo BRAMS e da correção aplicada sobre o BRAMS em relação aos totais diários, as Figuras 6 e 7 apresentam comparações da irradiação solar medida e estimada, durante o ano de 2009 nas estações de referência (Belém e Tartarugalzinho). Em geral, percebeu-se que o BRAMS representou com fidelidade a variabilidade da irradiação solar. Para Belém, o modelo (linha azul) tende a superestimar os dados medidos em todo o ano. Porém, a partir da

correção estatística (linha vermelha) os dados simulados tendem a aproximar-se dos dados medidos, como já observados nos totais mensais. Como consequência, há uma redução significativa dos índices estatísticos, exceto para a correlação. Destaque para a significativa redução do *EM* (*viés*), e do *EQM*, de 2,29 kWh/m<sup>2</sup> para 0,47 kWh/m<sup>2</sup> e 2,49 kWh/m<sup>2</sup> para 1,16 kWh/m<sup>2</sup>, respectivamente. Ainda na Figura 6, observa-se o diagrama linear e a dispersão para a estação de Belém, que mostra a tendência do modelo superestimar os valores de irradiação solar de maneira significativa em todo o ano. A correção se mostra capaz de aproximar os dados simulados aos dados medidos, reduzindo consideravelmente os erros.

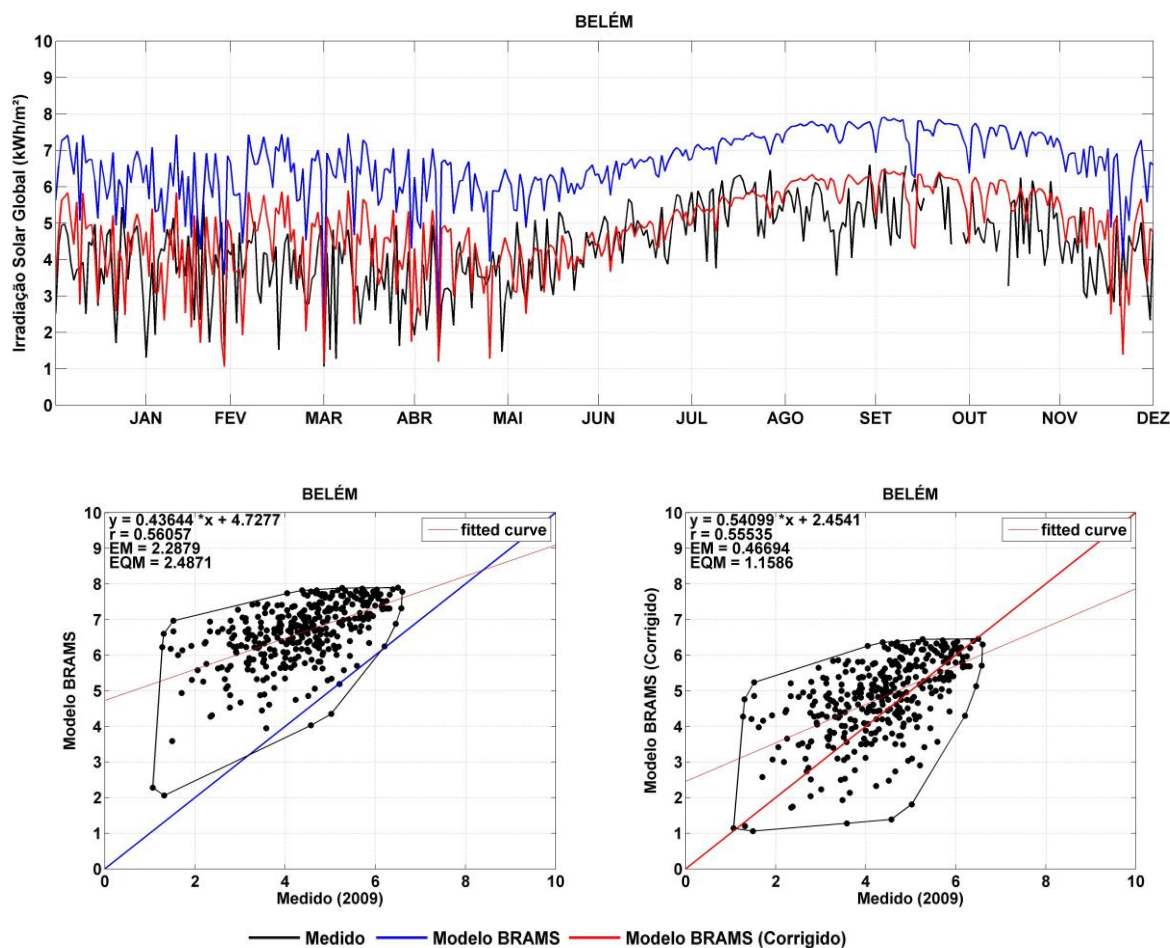


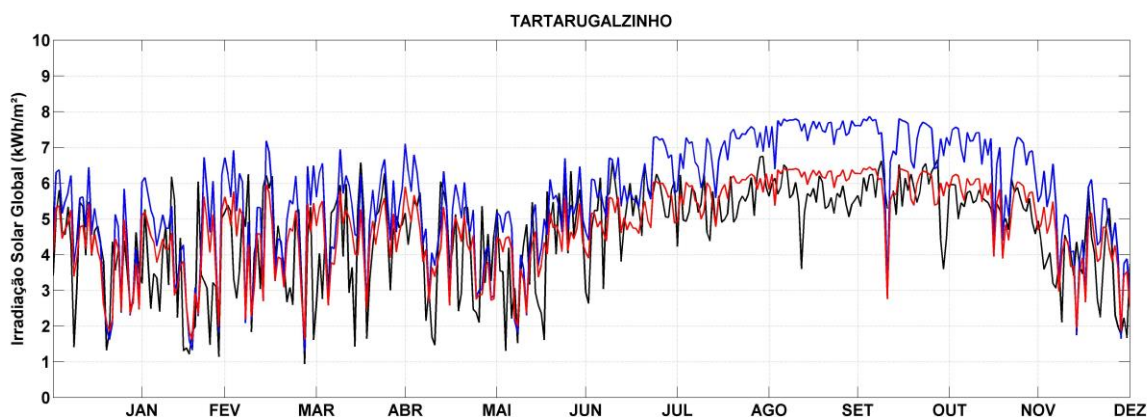
Figura 6. Comparação da irradiação solar (kWh/m<sup>2</sup>), integrais diárias, durante o ano de 2009, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados pelo modelo BRAMS (linha azul) e dados simulados pelo modelo BRAMS, com correção estatística, (linha vermelha), para a estação de Belém (A201), estações de referência.

Na Figura 7 apresenta as mesmas informações da anterior, mas considerando a estação de Tartarugalzinho. Observa-se um

comportamento similar ao da estação meteorológica de Belém. Entretanto, o modelo (linha azul) tende a superestimar de maneira mais

significativa os dados medidos nos meses de junho a novembro. Observa-se também uma redução interessante nos índices estatísticos,

alterando o viés, *EM*, e do *EQM*, de 1,01 kWh/m<sup>2</sup> para 0,20 kWh/m<sup>2</sup> e 1,60 kWh/m<sup>2</sup> para 1,08 kWh/m<sup>2</sup>, respectivamente.



(Continua...)

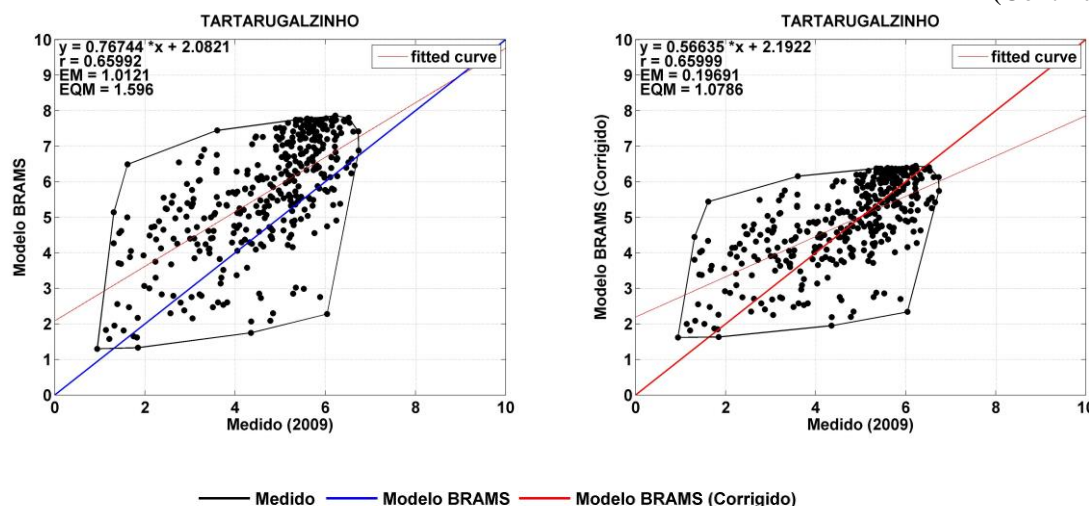


Figura 7. Comparação da irradiação solar (kWh/m<sup>2</sup>), integrais diárias, durante o ano de 2009, a partir dos dados observados (linha preta) com os dados simulados pelo modelo BRAMS (linha azul) e os dados simulados pelo modelo BRAMS, com correção estatística, (linha vermelha), para a estação de Tartarugalzinho (A243), estações de referência.

## Conclusões

Buscou-se neste trabalho avaliar o modelo de mesoescala BRAMS na representação da irradiação solar, considerando não somente a capacidade do modelo em simular os totais diários, mas também sua variabilidade diurna e sazonal. Tomou-se como área de estudo a Amazônia Oriental, contendo o Amapá e parte da região litorânea do Pará, no Norte do Brasil.

A partir da constatação da superestimativa dos valores de irradiação pelo modelo, comportamento já esperado, propôs-se o desenvolvimento de uma técnica estatística de remoção do erro sistemático. Em todas as

localidades utilizadas para a validação, o modelo consegue reproduzir de forma satisfatória a variabilidade da irradiação solar, o que de certo modo mostra que os fatores e as características meteorológicas locais estão bem representados dentro do modelo. Entretanto, confirmou-se a tendência de superestimativa do modelo BRAMS, e a técnica estatística de remoção de viés se mostrou satisfatória em todas as estações analisadas, foram obtidas simulações mais próximas dos dados observados, ou seja, com um comportamento médio mais próximo das observações. Os resultados mostraram que houve redução considerável no *EM* e no *EQM*, mas sem alteração significativa nos coeficientes de

correlação, o que é um resultado esperado a partir da metodologia proposta.

Conclui-se que, para o ano de 2009 o modelo ajustado foi capaz de simular a irradiação solar de forma satisfatória em todos os municípios em estudo, já que foram alcançados os objetivos de reduzir os erros sistemáticos do modelo. Os coeficientes de correlação indicaram boa concordância entre simulações e observações, com valores sempre superiores a 0,55. Isto mostra que o modelo foi eficiente para simular a irradiação solar durante o ano de 2009. Entende-se, com isso, que o modelo BRAMS é capaz de simular a irradiação solar na região, sendo necessária, no entanto a utilização de técnicas estatísticas, como a apresentada neste trabalho, para a diminuição do viés do modelo.

Para trabalhos futuros nessa mesma linha de investigação sugere-se fazer uso de técnicas mais robustas de remoção dos erros sistemáticos do modelo, como o *Kalman Filter*, Redes Neurais Artificiais e Regressão Linear Múltiplas, para otimizar a detecção de fenômenos que ocorrem em intervalos de tempo menores que os simulados neste trabalho. Outras possibilidades passam pela assimilação de dados observados de superfície ou a utilização de dados de grande escala de outras fontes na inicialização do modelo.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), pelos dados usados neste trabalho, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro dos autores por meio de bolsas de pesquisa.

### Referências

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica, Ministério de Minas e Energia, 2016. Balanço Energético Nacional – BEN, 2016: Ano base 2015: Resultados Preliminares. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro.

Camelo, H.D.N., 2007. Estudo numérico do vento Aracati para caracterização de seu potencial eólico. Dissertação (Mestrado). Fortaleza, UECE.

Cavalcanti, E.P., 2001. Teor e transporte de vapor d'água na atmosfera do Nordeste do Brasil. Tese (Doutorado). Campina Grande, UFCG.

Cavalcanti, I.F.A., Ferreira, N.J., Silva, M.G.A.J., Dias, M.A.F., 2009. Tempo e clima no Brasil.

Editora Oficina de Texto, São Paulo, pp. 197-212.

Cohen, J.C.P., Silva Dias, M.F., Nobre, C.A., 1989. Aspectos climatológicos das linhas de instabilidade na Amazônia. *Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática* 4, 34-40.

Cotton, W.R., Pielke R.A., Walko, R.L., Liston, G.E., Tremback, C.J., Jiang, H., McAnelly, R.L., Harrington, J.Y., Nicholls, M.E., Carrio, G.G., McFadden, J.P., 2002. RAMS 2001: Current status and future directions. *Meteorology and Atmospheric Physics* 82, 5–29.

Cunha, É.B.A.C., 2008. Investigação do potencial eólico de Região Serrana no Ceará. Dissertação (Mestrado). Fortaleza, UECE.

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).

Fedderson, H., Navarra, A., Ward, M.N., 1999. Reduction of model systematic error by statistical correction for dynamical seasonal predictions. *Journal of Climate* 12, 1974–1989.

Freire, J.L.M., DE Freitas, S.R., Coelho, C.A.D.S., 2015. Calibração do modelo regional BRAMS para a previsão de eventos climáticos extremos. *Revista Brasileira de Meteorologia* 30, 158–170.

Freitas, S.R., Longo, K.M., Silva Dias, M.A.F., Chatfield, R., Silva Dias, P., Artaxo, P., Andreae, M.O., Grell, G., Rodrigues, L.F., Fazenda, A., Panetta, J., 2009. 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* 9, 2843–2861.

Grell, G.A., Freitas, S.R., 2014. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. *Atmospheric Chemistry and 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* 29, 1693.

Juang, H.M.H., Kanamitsu, M., 1994. The NMC Nested Regional Spectral Model. *Monthly Weather Review* 122, 3-26.

- Kousky, V.E., 1979. Frontal influences on Northeast Brazil. *Montly Weather Review* 107, 1140-1153.
- Lima, F.J.L., Cavalcanti, E.P., Souza, E.P., Silva, E.M., 2012. Evaluation of the Wind Power in the State of Paraíba Using the Mesoscale Atmospheric Model Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modelling System. *ISRN Renewable Energy* 2012, 1–16.
- Lima, F.J.L., Martins, F.R., Pereira, E.B., Lorenz, E., Heinemann, D., 2016. Forecast for surface solar irradiance at the Brazilian Northeastern region using NWP model and artificial neural networks. *Renewable Energy* 87, 807–818.
- Longo, K.M., Freitas, S.R., Dias, M.A.S., Dias, P.L.S., Rodrigues, L.F., 2006. Numerical modelling of the biomass-burning aerosol direct radiative effects on the thermodynamics structure of the atmosphere and precipitation. *International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*, Foz de Iguaçu.
- Maria, P.H.S., Costa, A.A., Sombra, S.S., 2008. Modelagem numérica em alta resolução para previsão de geração de energia eólica no Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia* 23, 477–489.
- Martins, F.R., Pereira, E.B., Silva, S.A.B., Abreu, S.L., Colle, S., 2008a. Solar energy scenarios in Brazil, Part one: Resource assessment. *Energy Policy* 36, 2843–2854.
- Martins, F.R., Rüther, R., Pereira, E.B., Abreu, S.L., 2008b. Solar energy scenarios in Brazil. Part two: Photovoltaics applications. *Energy Policy* 36, 2855–2867.
- Martins, F.R., Abreu, S.L., Pereira, E.B., 2012. Scenarios for solar thermal energy applications in Brazil. *Energy Policy* 48, 640–649.
- Martins, F.R., Pereira, E.B., 2011. Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in Brazil. *Energy Policy* 39, 4378–4390.
- Mellor, G.L., Yamada, T., 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics* 20, 851–875.
- Molion, L.C.B, Bernardo, S.O., 2002. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia* 17, 1, 1-10.
- Molion, L.C.B., 1987. Climatologia Dinâmica da região Amazônica: mecanismos de precipitação. *Revista Brasileira de Meteorologia* 2, 107-117
- Moreira, D.S., Freitas, S.R., Bonatti, J.P., Mercado, L.M., Rosário, N.M.É., Longo, K.M., Miller, J.B., Gloor, M., Gatti, L.V., 2013. 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* 6, 1243–1259.
- Nobre, P., Srukla, J., 1996. Variations of Sea Surface Temperature, Wind Stress, and Rainfall over the Tropical Atlantic and South America. *Journal of Climate* 9, 2464-2479.
- Pereira, E.B., Martins, F.R., Abreu, S.L.deA., e Ruther, R., 2006. Atlas Brasileiro de Energia Solar. INPE, São José dos Campos.
- Pielke, R.A., Cotton, W.R., Walko, R.L., Tremback, C.J., Lyons, W.A., Grasso, L.D., Nicholls, M.E., Moran, M.D., Wesley, D.A., Lee, T.J., Copeland, J.H., 1992. A comprehensive meteorological modeling system - RAMS. *Meteorology and Atmospheric Physics* 49, 69–91.
- Pielke, R.A., 2013. *Mesoscale Meteorological Modeling*, 3 ed. Academic Press, Boulder, Colorado.
- Rosário, N.E., Longo, K.M., Freitas, S.R., Yamasoe, M.A., Fonseca, R.M., 2013. Modeling the South American regional smoke plume: Aerosol optical depth variability and surface shortwave flux perturbation. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13, 2923–2938.
- Souza, E.P., 1999. Estudos teóricos e numéricos da relação entre convecção e superfície heterogêneas na região Amazônica. Tese (Doutorado). São Paulo, USP.
- Tiepolo, G.M., 2015. Estudo do potencial de geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no estado do Paraná. Tese (Doutorado). Curitiba, PUCPR.
- Viana, T.S., Rüther, R., Martins, F.R., Pereira, E.B., 2011. Assessing the potential of concentrating solar photovoltaic generation in Brazil with satellite-derived direct normal irradiation. *Solar Energy* 85, 486–495.
- Walko, R.L., Cotton, W.R., Meyers, M.P., Harrington, J.Y., 1995a. New RAMS cloud microphysics parameterization part I: the single-moment scheme. *Atmospheric Research* 38, 29–62.
- Weber, A.H.; Buckner, M.R.; Weber, J.H., 1982. Statistical Performance of Several Mesoscale

Atmospheric Dispersion Models. Journal of Applied Meteorology 21, 1633-1644.  
Wood, A.W., Maurer, E.P., 2002. Long-range

experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. Journal of Geophysical Research 107, 1–15.