


Artigo

# Assimilação de Dados de Radiância do Sensor AMSU-A no GSI: Visão Geral sobre sua Importância para a Qualidade das Condições Iniciais na PNT do CPTEC. Assimilação de Dados de Radiância do Sensor AMSU-A no GSI/BAM/CPTEC: Descrição e Importância para a PNT

César Magno Leite de Oliveira Júnior<sup>1,2</sup> , Luiz Fernando Sapucci<sup>2</sup>, Carlos Frederico Bastarz<sup>2</sup>, João Gerd Zell de Mattos<sup>2</sup>, Paulo Yoshio Kubota<sup>2</sup>, Ivette Hernández Baños<sup>2</sup>, Cristiano Eichholz<sup>2</sup>, Renato Galante<sup>2</sup>, Bruna Barbosa Silveira<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.*

<sup>2</sup>*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, SP, Brasil.*

<sup>3</sup>*Centre National de Recherches Météorologiques, Université de Toulouse, Météo-France, Toulouse, France.*

Recebido em: 10 de Fevereiro de 2022 - Aceito em: 2 de Agosto de 2022

## Resumo

O *Gridpoint Statistical Interpolation* (GSI) é o sistema de assimilação de dados utilizado no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desde 2013 e atualmente integra, de maneira acoplada ao *Brazilian Global Atmospheric Model* (BAM), o Sistema de Modelagem Global (SMG). Por meio da abordagem variacional aplicada ao SMG, esse sistema permite assimilar de forma direta dados de radiância, os quais são atualmente o sistema de observação que apresenta o maior impacto positivo para a melhoria da qualidade das Previsão Numérica de Tempo (PNT) em escala sinótica. Com intuito de detalhar as particularidades necessárias para a assimilação desses dados e evidenciar sua importância para a qualidade dos produtos obtidos ao utilizar o SMG, o presente estudo destaca os principais pontos do tratamento dos dados de radiância dentro do GSI e apresenta resultados de um experimento usando dados do sensor AMSU-A a bordo de diversos satélites para descrever o comportamento espacial e temporal dos dados assimilados, em termos quantitativos e qualitativos. Usando os dados de radiância como referência, em uma comparação da previsão de curto prazo do modelo com as análises, observa-se que essas últimas apresentam uma diminuição dos erros indicando a eficiência do processo de assimilação de radiância, com impacto positivo na assimilação de outras bases de dados, como os da Rádio Ocultação GNSS aqui avaliados. Esse impacto deve contribuir para a melhoria da qualidade dos produtos de PNT gerados pelo CPTEC, o que deverá ser avaliado na continuidade dessa pesquisa.

**Palavras-chave:** radiância, assimilação de dados, GSI, 3D Var, BAM.

## Assimilation of Radiance Data from the AMSU-A Sensor in the GSI: Overview of its Importance for the Quality of Initial Conditions in the CPTEC NWP. Assimilation of Radiance Data from the AMSU-A Sensor in the GSI/BAM/CPTEC: Description and Importance for the NWP

## Abstract

The *Gridpoint Statistical Interpolation* (GSI) is the data assimilation system used in the Center for Weather Forecasting and Climate Studies (CPTEC) of the National Institute for Space Research (INPE) since 2013 and is currently part of the *Brazilian Global Atmospheric Model* (BAM), the *Global Modeling System* (SMG). Through the variational approach applied to the SMG, this system allows for the direct assimilation of radiance data, which currently represents the greatest impact for obtaining a better Numerical Weather Forecast (NWP) quality on a large scale. In order to detail

the particularities necessary for the assimilation of these data and call attention to its importance for the quality of the products obtained using the SMG, this study highlights the main points of the treatment of radiance data within the GSI and presents results of an experiment using AMSU-A sensor data on board several satellites to describe the spatial and temporal behavior of the assimilated data, in quantitative and qualitative terms. Using the radiance data as a reference, in a comparison of a short-term forecast of the model with the analyses, it is observed that the latter shows a decrease in error indicating the efficiency of the radiance assimilation process, with a positive impact on the assimilation of other databases, such as the GNSS Concealment Radio evaluated here. This impact should contribute to improving the quality of the PNT products generated by CPTEC, which should be evaluated in the continuation of this research.

**Keywords:** radiance, data assimilation, gridpoint statistical interpolation, 3D variational assimilation, Brazilian atmospheric model.

## 1. Introdução

A qualidade das análises obtidas pelas técnicas de Assimilação de Dados (AD) está diretamente associada com a qualidade da PNT (Previsão Numérica de Tempo) (Kalnay, 2003), uma vez que métodos de AD auxiliam na diminuição das incertezas associadas aos modelos. Os modelos de PNT, por meio de equações não lineares, descrevem de forma aproximada, o comportamento caótico da atmosfera. As incertezas do processo de modelagem podem ser provenientes das soluções numéricas, da discretização do espaço, da representação topográfica e fisiográfica, das lacunas de conhecimento dos processos físicos da atmosfera ou podem decorrer de fatores externos ao domínio do modelo, como deficiências na programação da interface entre modelo e sistema de assimilação de dados, além de aproximações empregadas para descrever o comportamento das demais componentes do sistema terrestre. Devido à dificuldade de compreender e conseqüentemente minimizar essas incertezas, utilizam-se as observações que estão associadas com as variáveis do modelo. Ao empregar técnicas de AD, que levam em consideração os erros do modelo e das observações, procura-se otimizar a inclusão das informações presentes nas observações de forma a se obter condições iniciais ótimas, de incerteza mínima, e que sejam as melhores condições iniciais para que o modelo de PNT seja o mais realista em comparação aos processos físicos observados.

O CPTEC utiliza o sistema *Gridpoint Statistical Interpolation* (GSI) (Shao *et al.*, 2016) para a assimilação de dados. Os dados de observações que podem ser assimilados no GSI são provenientes de diversas fontes como as variáveis medidas em estações meteorológicas de superfície instaladas no continente, em bóias oceânicas ou embarcadas em navios, bem como dados de ar superior provenientes de radiossondas, drop sondas, dados de sensores meteorológicos a bordo de aviões, entre outros. O avanço computacional e tecnológico das últimas décadas permitiu que a área de sensoriamento remoto ganhasse um papel significativo na capacidade de melhoramento da previsão do tempo. Esta evolução se deu a partir da utilização dos dados observacionais oriundos dos satélites no processo de AD, conforme pode-se acompanhar nos relatórios apresentados pelos centros operacionais de PNT (Burrows, 2020). Dados de observações provenientes de

sensoriamento remoto, de modo geral, são a maioria das informações disponíveis para o processo de AD, embora apresentem incertezas por tratarem de estimativas baseadas em algoritmos numéricos com diferentes níveis de processamento. No entanto, no processo de AD essas incertezas são levadas em consideração dentro de um processo estatístico de minimização, de tal forma que essas observações, embora imprecisas, impactam positivamente na qualidade final das previsões.

Os dados de satélites usados na assimilação podem ser divididos em três conjuntos bem definidos. O primeiro conjunto representa os dados de vento por satélite obtidos por técnica de correlação de nuvens em imagens de satélites denominada *Atmospheric Motion Vectors* (Negri e Machado, 2008). O segundo, representa os dados de rádio ocultação por *Global Navigation Satellite System* (GNSS), que através de técnicas de perfilamento baseadas na propagação do sinal na atmosfera, permite obter, em alta resolução vertical, informações da atmosfera terrestre, as quais são bastante exploradas na AD (Baños *et al.*, 2018). O terceiro grupo, é o mais importante, incluem as radiancias, que são fornecidas por diversos sensores passivos que encontram-se em uma constelação de satélites de agências espaciais internacionais, com cobertura global. A abundância de dados de radiancias auxilia na minimização das deficiências das demais bases de dados. Ao analisar a distribuição dos dados convencionais no globo, verifica-se que por questões econômicas e geográficas, o Hemisfério Norte possui uma concentração de observações sinóticas mais densas em comparação ao Hemisfério Sul. Isto pode ser explicado por alguns fatores, como a proporção das áreas continentais em relação à área coberta por oceanos entre os Hemisférios Norte e Sul. Sobre o Hemisfério Norte, devido ao fato de que as malhas aéreas europeia e norte-americana são bastante densas (em comparação com as rotas aéreas sobre grandes áreas oceânicas, predominantes sobre o Hemisfério Sul), gera-se um grande volume de informações provenientes de sensores instalados em aviões. Estes aspectos evidenciam a necessidade e a importância do uso de dados de radiancia na assimilação para a PNT, a qual, por esse motivo, tem contribuído substancialmente para a melhoria da qualidade das previsões, principalmente sobre o Hemisfério Sul (Azevedo *et al.*, 2017).

Embora os dados de radiancia sejam os que apresentam maior impacto para a AD (Bormann *et al.*, 2019), o

número de trabalhos de pesquisa realizados no Brasil que exploram suas particularidades, é muito baixo se levado em consideração a importância dessa base de dados. O trabalho de Penna *et al.* (2015) é um dos poucos na literatura brasileira que trata da assimilação de dados de radiação e está focado nos canais sensíveis à superfície. Visando contribuir para melhorar o entendimento dessa importante base de dados, o presente trabalho tem o objetivo fazer uma revisão do processo de assimilação de dados de radiação no GSI detalhando os aspectos relevantes que fazem destes os mais importantes e de maior impacto para a melhoria na qualidade das análises. Neste trabalho, a versão do GSI acoplada ao modelo *Brazilian Global Atmospheric Model* (BAM) foi utilizada, assimilando dados do sensor *Advanced Microwave Sounding Unit-A* (AMSU-A). Ainda que esse sensor tenha um baixo número de canais entre os demais sensores, o que simplifica sua utilização, ele apresenta um significativo impacto na assimilação de dados, visto que possui ampla cobertura no globo, que suas observações são menos sensíveis a nuvens altas e finas, fornece medições para a banda de absorção de oxigênio, além de simular verticalmente a atmosfera em quase todas as condições climáticas, com exceção de chuvas torrenciais. Soma-se a isso o fato da contribuição deste e de outros dados de radiação no hemisfério sul, sendo responsável por uma importante parcela de todo o impacto da assimilação de dados de radiação nesta região (Kutty e Wang, 2015).

Este trabalho está organizado da seguinte forma: na Subseção 2.1 é apresentada uma revisão sobre a assimilação de dados de radiação e seu impacto na melhoria da qualidade da análise obtida. Na Subseção 2.2 é detalhado o processo de assimilação de dados de radiação utilizando o sistema GSI, com ênfase para o controle de qualidade realizado dentro da metodologia variacional de minimização da função custo. Na Subseção 2.3 é detalhado o experimento realizado para avaliar a assimilação de dados de radiação. Na Subseção 2.4 são apresentados os métodos de avaliação dos resultados. Todos esses tópicos mencionados fazem parte da metodologia utilizada neste estudo para a obtenção dos resultados, os quais são apresentados e discutidos na Seção 3. Na Seção 4 são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

## 2. Metodologia

### 2.1. Assimilação de dados de radiações do sensor AMSU-A

Conforme Talagrand (1997), o objetivo da assimilação de dados é utilizar todas as informações disponíveis para se determinar com a maior precisão possível o estado do fluxo atmosférico (ou oceânico). Inicialmente, nas primeiras soluções da AD, os dados de radiação eram inseri-

dos de maneira indireta no passo de assimilação uma vez que os modelos de transferência radiativa não eram desenvolvidos de maneira sofisticada, ocasionando uma simplificação da informação no processo. A temperatura de brilho observada pelos instrumentos de sensoriamento remoto era introduzida no processo ao utilizar perfis atmosféricos recuperados (*retrievals*) das variáveis do modelo, através de um Modelo de Transferência Radiativa (MTR). Um exemplo é Andreoli *et al.* (2008), que reportou os primeiros resultados da assimilação de dados de radiações no Brasil utilizando *retrievals*, os quais destacaram a importância e impacto positivo desses dados para a melhoria da previsão de tempo sobre a América do Sul. Entretanto, esses perfis continham incertezas devido aos algoritmos utilizados para a sua determinação, as quais interferiam na qualidade da assimilação dos dados, prejudicando a eficiência da técnica.

Para equacionar esse problema, desenvolveu-se uma maneira de utilizar diretamente os dados de sensoriamento remoto no processo de assimilação de dados, utilizando para isso o MTR dentro do processo de AD como operador de observações. Nesse contexto, um operador de observações é a componente física do sistema de assimilação de dados que mapeia ou estabelece a equivalência entre as quantidades físicas observadas, tais como as radiações, e as variáveis de estado do modelo numérico, tais como temperatura e umidade. O MTR permite simular a temperatura de brilho observada por um satélite a partir das variáveis de estado dos modelos de PNT (Rodgers, 2000). A técnica define a transferência radiativa a partir da emissão e da absorção, uma vez que se buscam as faixas de frequência, em geral micro-ondas e infravermelho, com baixo índice de espalhamento, e isto pode ser representado conforme Eq. (1) a seguir.

$$I_{\nu}(0) = \varepsilon_{\nu} B_{\nu}(T_s) \Gamma_{\nu}(p_s, 0) + (1 - \varepsilon_{\nu}) \Gamma_{\nu}(p_s, 0) \times \int_0^{p_s} B_{\nu}[T(p)] \frac{\partial \Gamma_{\nu}(p_s, p)}{\partial p} dp + \int_{p_s}^0 B_{\nu}[T(p)] \frac{\partial \Gamma_{\nu}(p, 0)}{\partial p} dp \quad (1)$$

Na Eq. (1)  $\nu$  representa a frequência,  $I_{\nu}(0)$  a radiação que chega no topo da atmosfera,  $\Gamma(p_s, 0)$  é a transmitância expressa com respeito ao topo da atmosfera,  $\varepsilon_{\nu}$  representa a emissividade da superfície na frequência  $\nu$ ,  $B_{\nu}(T)$  é a função de Planck,  $p$  representa o nível de pressão,  $p_s$  refere-se a pressão na superfície,  $T$  ao perfil de temperatura e  $T_s$  a temperatura na superfície. O primeiro termo do lado direito da Eq. (1) representa a contribuição da emissão da superfície, o segundo a contribuição da reflexão da superfície da radiação emitida pela atmosfera para a superfície e o último termo da equação, mostra a emissão da atmosfera. Uma descrição completa sobre os contribuintes da temperatura de brilho e suas representações matemáticas podem ser encontrados em Silveira (2018).

Diversos centros operacionais de PNT desenvolveram seus MTR, com a finalidade de aprimorar a assimilação de dados de radiação. Conforme apresentado em [Saunders et al. \(2018\)](#) o modelo *Radiative Transfer for TOVS* (RTTOV) foi desenvolvido na década de 1990 pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) para permitir a assimilação direta de radiações. Embora inicialmente desenvolvido para os radiômetros *TIROS Operational Vertical Sounder* (TOVS), o RTTOV pode simular cerca de 90 sensores de satélite diferentes medindo nas regiões de micro-ondas, infravermelho e visível do espectro. No *National Centers Environmental Prediction* (NCEP) foi desenvolvido o *Community Radiative Transfer Model* (CRTM) o qual foi implementado no GSI e portanto também utilizado no CPTEC.

A utilização do CRTM nos processos de assimilação, como operador de observação ou na simulação de perfis atmosféricos, permite verificar a precisão da medição, a incerteza e a estabilidade de longo prazo. Essa avaliação da qualidade dos dados é essencial para a PNT, visto que, conforme apresentado anteriormente, em algumas regiões do globo os dados observacionais convencionais são escassos e, portanto, essa base de dados é fundamental nessas regiões. Além disso, há um outro fator importante para que o processo de AD de radiação seja executado com êxito como a escolha dos canais a serem assimilados. Embora o CRTM trabalhe em diversas faixas de frequência, existem intervalos do espectro que se comportam melhor na atmosfera. Como os constituintes atmosféricos interagem com as ondas do espectro eletromagnético, é ideal trabalhar nas faixas de frequência onde os componentes espalhadores de radiação estejam praticamente ausentes.

Especificamente, tratando da faixa espectral das micro-ondas, de 0,3 GHz a 300 GHz, as moléculas de  $O_2$  e  $H_2O$  possuem intervalos do espectro onde há uma alta interação com as micro-ondas, reduzindo de maneira abrupta a quantidade de radiação que atravessa a atmosfera em determinadas faixas de frequência.

Conforme apresentado em [Liou \(2002\)](#), nota-se absorção devido ao oxigênio molecular na faixa em torno de 60 GHz e 120 GHz, de uma influência da absorção do vapor d'água na faixa em torno de 20 GHz e uma grande influência em torno de 180 GHz. Além disso, nota-se mais dois fatores. Primeiro, conforme o comprimento de onda diminui (ou a frequência aumenta), a transmitância também diminui. Segundo, em algumas faixas do espectro a transmitância se aproxima de 1 (chamadas de janelas atmosféricas) indicando, conforme definição anterior, que grande parte da radiação que incide nos sensores consegue atravessar a atmosfera. Isto, por sua vez, é um indicativo que a temperatura de brilho detectada tende a ser mais acurada, já que para uma boa modelagem da transferência radiativa busca-se uma boa aproximação para as micro-ondas e, assim, o efeito desprezível da extinção exercida

pelos componentes atmosféricos, conforme discutido em [Silveira \(2018\)](#).

Além disso, as medidas de radiação utilizados na assimilação de dados são provenientes de sensores embarcados em satélites, operando na faixa espectral infravermelha ou na faixa espectral de micro-ondas. Atualmente há em operação uma série de sensores de radiação embarcados em satélites das principais agências espaciais, cada um com suas especificações e diferentes faixas de frequência, com os quais se obtém um volume denso de informações disponíveis para a assimilação de dados.

Para não sobrecarregar o sistema de assimilação de dados com informações duplicadas ou problemas similares, cresce a importância da seleção dos instrumentos de sensoriamento remoto e para fazê-la corretamente [Diniz e Todling \(2020\)](#) avaliam o impacto da contribuição de determinados instrumentos na AD. A relevância destes sensores é destacada abaixo, elencados pela importância atribuída pelo autor:

- **AMSU-A:** O sensor de radiação no e micro-ondas que compõe o sistema *Advanced Tiros Operational Vertical Sounder* (ATOVS), o qual contém 15 canais que trabalham em faixas de frequência até 89 GHz e que estão baseados em parâmetros da resposta do vapor de água. Esse sensor encontra-se embarcado nos satélites NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19, Metop-A (até novembro de 2021), Metop-B e Metop-C.
- **IASI:** O *Infrared Atmospheric Sounding Interferometer* (IASI) é um sensor com alta resolução espectral no infravermelho que possui 8.461 canais e está a bordo dos satélites da família Metop da *European Space Agency* (ESA);
- **AIRS:** O sondador atmosférico *Atmospheric Infrared Sounder* (AIRS) lançado pela *National Aeronautic and Space Administration* (NASA) em 2002, a bordo do satélite AQUA, é o primeiro instrumento da nova geração de sensores hiperspectrais de radiação infravermelha, cuja finalidade principal é fornecer informações de boa qualidade da atmosfera a partir dos seus 2.378 canais.
- **MHS:** O Sondador *Microwave Humidity Sounder* (MHS) é um sensor de cinco canais com radiômetro de auto-calibração rotativa de micro-ondas no nadir dos satélites Metop-a (até novembro de 2021), Metop-B e Metop-C e NOAA-18 e 19;
- **HIRS:** Outro sensor que compõe o sistema ATOVS é o *High Resolution Infrared Radiation Sounder* (HIRS) coleta dados multiespectrais no comprimento de onda visível de 0,69  $\mu\text{m}$ , sendo que 7 canais trabalham na banda de onda curta entre 3,7 e 4,6  $\mu\text{m}$ ; e 12 canais se trabalham na onda longa entre 6,5 a 15  $\mu\text{m}$ ;

Destaca-se que o AMSU-B também compõe o sistema ATOVS, contendo 5 canais que trabalham em faixas de frequência a partir de 89 GHz. Esse sensor encontra-se embarcado no satélite NOAA-15 e também podia ser

encontrado nos satélites NOAA-16 e NOAA-17. Nos satélites mais recentes da série NOAA e nos satélites da linha Metop foi substituído pelo MHS.

A utilização de dados de radiância tem uma importância significativa em relação à qualidade da previsão. Isso fica claro em alguns trabalhos como em McNally (2012) onde o autor evidencia a relevância das observações dos satélites de órbitas polares, europeus e americanos, no *skill* dos modelos de PNT. Já em Azevedo *et al.* (2017), por meio de experimentos do tipo *Observation System Experiments* (OSE), são retidos da assimilação diferentes tipos de observações (GPS, radiância e radiossondas) e apresentada a influência da ausência destas, destacando a importância da radiância através da conservação da correlação de anomalia e do controle da magnitude da raiz do erro quadrática médio. Entretanto, destaca-se também que a utilização de uma quantidade muito grande de observações não implica diretamente em melhores resultados para a assimilação. Como dito anteriormente, se faz necessário um correto entendimento de quais sensores e quais canais devem ser utilizados no processo de AD, cuja avaliação deve ser feita levando em consideração as particularidades do conjunto modelo e sistema de assimilação utilizados. Sabe-se que para o processo de assimilação ter êxito não basta utilizar todos os satélites, com todos os sensores disponíveis e todos os canais ligados. É necessário priorizar os instrumentos de observação que produzam melhores resultados nos produtos da PNT e selecionar apenas aqueles que apresentem menores diferenças entre a observação e a simulação e que possuem poucas observações barradas nos processos de controle de qualidade. Desta forma, destaca-se o desempenho do AMSU-A que produz impactos mais significativos do que outros sensores e outros sistemas de observação. Isto pode ser verificado em Zapotocny *et al.* (2008) e Kelly *et al.* (2007), que apresentam estudos comparando dados de diversas fontes de observação, entre eles alguns sensores de radiância como AMSU-A, HIRS e AIRS.

A variedade de canais, atuando em diferentes faixas de frequência, é justificada pela necessidade de aferir informações em diferentes níveis de altura. A variação da transmitância com a vertical é conhecida como função peso e o valor máximo desta função indica de qual camada da atmosfera a radiância é predominantemente oriunda. Essa função peso é dada por uma função normal no perfil vertical cujo pico máximo é frequentemente utilizado para localizar verticalmente as observações de radiância no processo de AD. A Fig. 1 apresenta um esquema onde são listados os canais, frequências, polarizações bem como uma representação das funções pesos de cada um dos canais do sensor AMSU-A.

Os canais destacados na Fig. 1 são classificados em dois grupos. Os canais 1, 2, 3 e 15 são denominados canais de janela, pois apresentam grande parte da radiância nestas

Função peso dos canais do AMSU-A

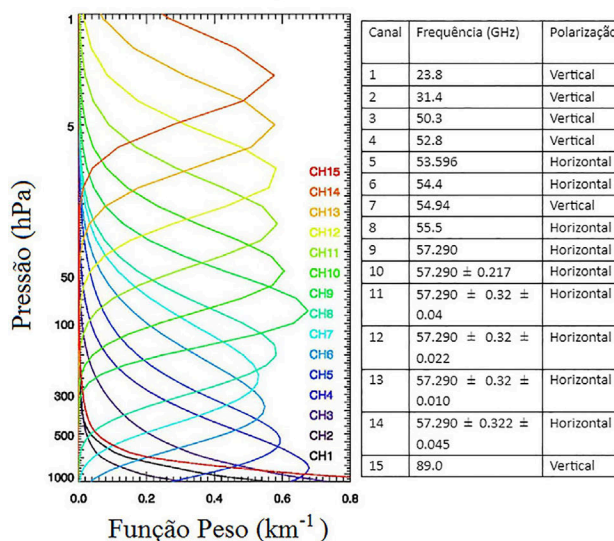


Figura 1 - Características radiométricas dos canais do sensor AMSU-A. Fonte: Adaptado de Kim *et al.* (2014).

frequências oriundas da superfície. Os demais canais são classificados como canais de sondagem, uma vez que a combinação destes fornece informações que contribuirão para estimativa de um perfil atmosférico de temperatura na área de sensoriamento. O canal 4 não é necessariamente um canal de janela, entretanto o pico da função peso nesta faixa de frequência é próximo a superfície. A principal diferença entre os dois grupos de canais é que para os canais de janela a atmosfera é mais transparente, enquanto para os canais de sondagem a atmosfera é opaca em algum nível vertical. Há também a diferença do tipo de sistema de polarização utilizado em cada canal, que tem por responsabilidade filtrar o pulso de energia que atinge o sensor, de modo que as vibrações do campo elétrico da onda se propagam em um único plano. Contudo os efeitos dos processos inerentes da onda com a matéria são mais propensos a degradar o desempenho do sistema na polarização horizontal do que na polarização vertical. Ao tratar especificamente do AMSU-A, constata-se em Silveira (2018) que a utilização dos canais sensíveis à superfície é restrita, priorizando os canais que não necessitam de uma representação da temperatura da superfície e da emissividade tão acurada.

## 2.2. Assimilação de dados de radiância no CPTEC utilizando o GSI

O GSI (Kleista *et al.*, 2009) é um sistema de assimilação desenvolvido pelo NCEP em parceria com a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). O desenvolvimento desse software é administrado pelo *Developmental Testbed Center* (DTC) do *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), o qual organiza, mantém e disponibiliza as versões comunitárias do sistema. O GSI tem a capacidade de assimilar diversos tipos de siste-

mas de observação, como dados coletados em sensores em estações à superfície, provenientes de radiossondas, a bordo de aviões, em bóias oceânicas, a bordo de navios, bem como a partir de satélites artificiais na órbita da Terra. O GSI aborda diferentes algoritmos de análise, como as técnicas variacionais *3-Dimensional Variational* (3DVar) e *4-Dimensional Variational* (4DVar), além de técnicas que envolvem a utilização de *ensembles* baseadas no *Ensemble Kalman Filter* (EnKF), a partir do qual podem ser obtidas matrizes de covariâncias híbridas aplicadas em algoritmos avançados como o *Hybrid Ensemble 3-Dimensional Variational* (3DEnVar) e o *Hybrid Ensemble 4-Dimensional Variational* (4DEnVar).

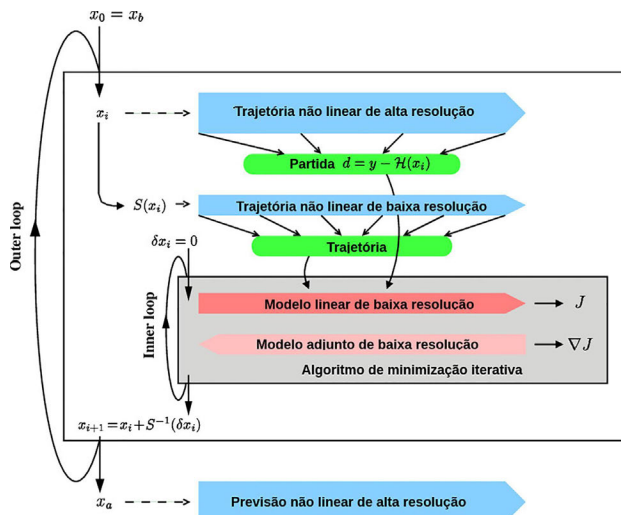
No CPTEC, visando a operação da assimilação de dados e, de acordo com a atual capacidade computacional do centro, a ênfase tem sido dada para aplicação do método 3DVar do GSI. Na abordagem dessa técnica, supõe-se que as distribuições dos erros de modelagem e dos erros de observação sejam Gaussianas. Nesta suposição, a média da distribuição dos erros das variáveis de estado é zero e o seu desvio padrão é representado pelo erro da observação analisada. Nesse método, a análise é obtida a partir da minimização da função custo variacional, representada pela Eq. (2) a seguir, conforme Ide et al. (1997):

$$J(x) = \frac{1}{2} (x^T B^{-1} x) + \frac{1}{2} [y^o - H(x^b)] R^{-1} [y^o - H(x^b)] \quad (2)$$

Na Eq. (2) temos os termos  $J_b$  e  $J_o$ . O termo  $J_b$ , que é o primeiro termo da soma, representa o termo da função custo referente às previsões do modelo e  $J_o$ , que é o segundo termo da soma, representa o termo da função custo referente às observações.  $x$  é o vetor de estado a ser analisado,  $x^b$  é o vetor de estado previsto,  $B$  é a matriz de covariâncias dos erros de previsão utilizada no NCEP e adaptada ao modelo BAM,  $y^o$  é o vetor de observação,  $H$  é o operador observação não linear (responsável por interpolar e relacionar as variáveis de estado com as observações, nos respectivos pontos onde se encontram) e  $R$  é a matriz de covariância dos erros de observação. Além dos termos elencados, pode-se destacar também o termo  $y^o - H(x^b)$ , que é o termo de inovação, representado pela diferença entre a observação e o *background* interpolado no ponto da observação.

O processo de minimização da função custo representada pela Eq. (2), considerada a inversão da matriz  $B$ . Em sistemas de previsão e assimilação de dados operacionais, a primeira parte da função custo, pode considerar facilmente  $10^6$  variáveis de estado (incluindo todos os pontos de grade do modelo, na horizontal e na vertical). Nesse sentido, a representação completa da matriz de covariâncias  $B$ , torna-se inviável e ela precisa ser representada de forma simplificada. Consequentemente, a minimização da função custo precisa levar em conta a forma da matriz  $B$ . No GSI a minimização da função custo é reali-

zada de forma iterativa pelo método do gradiente conjugado. Destaca-se que o método considera o pré-condicionamento da matriz  $B$  a fim de que o custo computacional envolvido na sua representação seja reduzido. O método do gradiente conjugado é um método iterativo de minimização de funções objetivas (tal como a função custo do 3DVar), de convergência rápida para sistemas simétricos, onde o objetivo é encontrar soluções aproximadas em cada tempo de iteração no processo de minimização. Uma visão geral sobre o método é apresentada em Bastarz (2017), destacando o processo de minimização e seus detalhes. O processo de minimização requer que os operadores envolvidos na minimização da função custo sejam linearizados. Por outro lado, a dinâmica que descreve o comportamento da atmosfera é caótica e não linear. Para minimizar o impacto dessa inconsistência, o processo de minimização da função custo variacional é feito por meio de iterações externas (*outer-loops*) e internas (*inner-loops*). A Fig. 2 apresenta de forma esquemática mais detalhes sobre esses processos e como eles se relacionam. Para cada iteração externa, o operador observação não linear  $H(x^b)$  é aplicado sobre o vetor de estados do modelo, onde são consideradas as relações não lineares entre as variáveis de estado e as observações. Para cada iteração externa, há uma quantidade pré-definida de iterações internas. Durante estas iterações, o operador observação linear  $H(x^b)$  é aplicado, onde são consideradas as relações lineares entre as variáveis de estado e as observações. É



**Figura 2** - Representação do funcionamento do processo de minimização e do processo de linearização introduzidos nas interações internas *inner-loops* e externas *outer-loops*, respectivamente. Basicamente o processo de minimização divide-se em dois passos principais. Os processos em azul e verde são as etapas do *outer-loops* responsáveis pela linearização das equações que definem a dinâmica da atmosfera. Os processos em tons de vermelho são as etapas responsáveis por utilizar as observações para otimizar iteradas vezes os campos das variáveis do modelo. Conforme descrito no texto, é nesta etapa que, de fato, ocorre a minimização da função custo. Fonte: Adaptado de Rabier e Liu (2003).

nesta etapa onde ocorre propriamente a minimização da função custo  $J$ , a partir do cálculo iterativo do seu gradiente  $\nabla J$  pelo método do gradiente conjugado.

Durante a etapa de minimização da função custo variacional, é também realizado o controle de qualidade das observações a serem assimiladas. Atualmente, a quantidade de observações disponíveis para assimilação é tipicamente da ordem de  $10^6$ , sendo que os dados não convencionais representam cerca de 95% do total dos dados. De forma geral, entre os dados convencionais e não convencionais, ocorrem redundâncias e discrepâncias que devem ser verificadas durante o processo de assimilação. Duas etapas envolvidas nesse processo, durante as iterações externas, são a checagem em grupo (*buddy check*) e a checagem com o cenário (*background check*). No *buddy check*, a observação considerada é comparada com as observações vizinhas, de forma que discrepâncias na sua representação podem ser filtradas. No *background check*, de forma semelhante, a observação é comparada com a informação representada pelo *background*, i.e., com a previsão utilizada no processo de assimilação. De acordo com a representação simplificada da Eq. (2), se as observações a serem utilizadas para a atualização do *background* não puderem ser consideradas no processo, seja devido aos erros de representatividade ou grosseiros, maior peso será dado para o *background*. Por outro lado, se o erro das previsões representados pela matriz  $B$  indicar que as previsões não são confiáveis, esta parte da função custo possuirá menor peso, visto que o termo  $J_b$  é ponderado pelo inverso da matriz de covariâncias dos erros de previsão. Nas etapas relacionadas com as iterações internas, o processo de controle de qualidade variacional das observações é realizado também durante a etapa de minimização da função custo. Para isso, a medida em que as observações são lidas pelo sistema, é realizado o *gross check* em que são atribuídos pesos às observações que as penalizam quando a inovação é muito grande (Andersson e Jarvinen, 1998). Durante o processo, são lidas tabelas que contém informações sobre o uso de determinados tipos de observações convencionais e não convencionais (e.g., por meio de *flags* especiais, pode-se determinar se um tipo de observação deve ser utilizado, monitorado ou simplesmente descartado).

### 2.2.1. Assimilação de dados de radiação no GSI

No processo de assimilação no GSI o conjunto de observação é dividido em três subconjuntos e tratados separadamente devido a certas particularidades no que se refere ao controle de qualidade dos dados. O primeiro subconjunto são os dados de radiação, e o segundo é formado por dados de rádio ocultação GNSS, enquanto todos os demais tipos de dados, incluindo os dados de vento por satélites, formam o terceiro subconjunto.

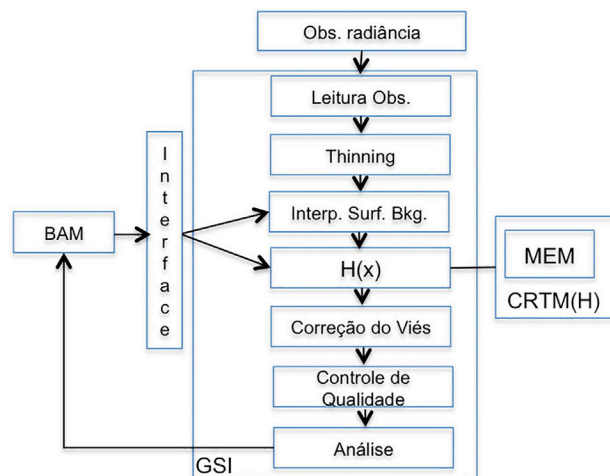
Para os dados de radiação, o processo é dividido em diferentes etapas ou filtros, nos quais os dados são sub-

metidos e a base de dados a ser efetivamente assimilada vai sendo dinamicamente rearranjada dentro do processo de minimização. A Fig. 3 mostra um fluxograma das principais componentes do processo da assimilação de radiação no GSI-BAM. Inicialmente os dados de observação de radiação são avaliados se estão dentro do domínio do modelo no aspecto espacial e dentro da janela de dados da assimilação no aspecto temporal. No segundo estágio é aplicado um processo de *thinning* nos dados para reduzir a quantidade de observações, descartando dados sobrepostos e redundantes, diminuindo desta forma o custo computacional do processo em geral. Após esta etapa, o estado inicial do modelo (*background*) é interpolado para a localização da observação e, em seguida, é realizada a simulação da radiação através do CRTM por meio do operador  $H(x^b)$ . Por fim, o sistema realiza uma correção de viés relacionada ao ângulo zenital da observação e a massa (Harris e Kelly, 2001) entregando estes dados ao controle de qualidade do GSI, onde diversos parâmetros serão analisados, como, por exemplo, erros nos valores da diferença entre o estado inicial e a observação e presença de nuvens no espaço da observação.

Destaca-se que etapas importantes da assimilação ocorrem dentro do processo iterativo. Nos *outer-loops*, além do processo de linearização, também ocorre o controle de qualidade, enquanto nos *inner-loops* ocorre a minimização da função custo, geralmente com o método de gradiente conjugado, e a obtenção da análise para iniciar o próximo *outer-loop*.

### 2.3. Experimento de assimilação de dados de radiação no GSI

Para atingir os objetivos propostos neste trabalho foram feitos alguns experimentos, utilizando o Sistema de Modelagem Global (SMG) do CPTEC, o qual contempla



**Figura 3** - Fluxograma das principais componentes da assimilação de radiação no GSI-BAM. Mais detalhes são fornecidos no texto. Fonte: (Silveira, 2018).

como modelo de PNT o BAM e a versão 3.3 do GSI a ele acoplado. O objetivo principal desse sistema é desenvolver uma estrutura que integre devidamente todos os módulos principais que possibilitem a obtenção das melhores previsões de tempo em escala global, mas com ênfase para a América do Sul, com todas as particularidades regionais devidamente tratadas. Entende-se melhores previsões de tempo, aquelas que sejam capazes de capturar o comportamento médio da atmosfera tanto espacialmente como temporalmente com informações com a melhor qualidade possível, com incertezas associadas. Esse sistema está incorporado dentro de um grande projeto no qual diversos aspectos têm sido abordados, tais como: a) Contínuo desenvolvimento do modelo BAM visando melhorar os resultados e ampliar a eficiência, diminuindo o custo computacional; b) aperfeiçoamento do processo de Assimilação de dados visando a obtenção de condições iniciais mais adequadas para que o BAM atinja seu máximo potencial; c) Uso eficiente da base de dados disponível no CPTEC, no qual todos os diversos sistemas de observação devem ser avaliados e seu impacto para a qualidade das previsões geradas identificado e aprimorado constantemente; d) Integração com a previsão por conjunto, no qual a perturbação do ensemble de análise será feita dentro do processo de assimilação de dados; e) Integração com outras componentes do sistema terrestre tais como modelagem de processos a superfície, acoplamento de modelos oceânicos e de processos químicos, os quais posteriormente podem receber investimentos para se ter também sistemas de assimilação de dados. O presente estudo contribui com o item c) listado acima, sendo o SMG portanto, um ambiente adequado para a realização desse estudo focado nos dados de radiação.

### 2.3.1. Descrição do BAM

Funcionando operacionalmente desde 1° de janeiro de 2016, o BAM (Figueroa *et al.*, 2016) é um modelo espectral hidrostático que possui como variáveis de estado a divergência, vorticidade, temperatura virtual, umidade específica e o logaritmo natural da pressão em superfície, além da orografia. O modelo utiliza transporte de umidade semi-Lagrangiano além de um esquema de microfísica de nuvens e prognóstico para os traçadores ozônio, conteúdo de água líquida em nuvens e umidade específica. Em substituição ao modelo utilizado anteriormente no CPTEC, o *Atmospheric General Circulation Model 3*, o BAM além de trabalhar com o estado da arte em esquemas de parametrização, possui a resolução TQ0299L064, ou seja, truncamento triangular na onda zonal de número 299 que apresenta uma resolução horizontal de 45 km próximo ao equador e 64 camadas na vertical sigma, com passo de integração do modelo de 180 s. O topo do modelo é de 0,4 hPa para o L64 e a espessura da primeira camada é de 35 e 40 m, dependendo da pressão e da temperatura. Além disso, possui o esquema de superfície terrestre *Integrated*

*Biophere Simulator* (IBIS) (Foley *et al.*, 2005) aprimorado por Kubota (2012)), o Modelo de Transferência Radiativa Rápida para GCMs (RRTMG) como esquema de radiação de ondas curtas (Tarasova e Fomin, 2000) e longas (Chou *et al.*, 2001), o esquema de Morrison de microfísica de nuvens (Morrison *et al.*, 2009) e como esquema de convecção utiliza o de Park e Bretherton 2009.

Devido à alta complexidade do modelo, que envolve um número elevado de resoluções de equações não lineares, há a necessidade de se discretizar as quatro dimensões do modelo. O tempo é dividido em intervalos fixos e a diferenciação é feita por um método semi-implícito envolvendo as equações da continuidade. Já as variações espaciais nas duas dimensões horizontais são representadas por coeficientes de projeção sobre uma base de funções que formam um conjunto ortonormal completo, que são particularmente adequadas para movimentos de fluidos com geometria esférica. Por fim, a discretização vertical se dá em 64 níveis distribuídos em escala logarítmica, com maior concentração de níveis em locais mais próximos à superfície (Sapucci *et al.*, 2018).

### 2.3.2. Configuração dos experimentos

Para evidenciar a importância da assimilação de dados de radiação, dois experimentos foram feitos nos quais no primeiro, os dados de radiação foram assimilados (Exp01) e no segundo, totalmente idêntico em sua configuração, mas com a diferença de que esses dados não foram assimilados (Exp02). A base de dados utilizados em ambos os experimentos são provenientes de diversas fontes, como já descrito anteriormente. No que se refere a dados de satélites foram utilizados dados de vento por satélite obtidos pela técnica de correlação de nuvens em imagens de satélites denominada *Atmospheric Motion Vectors* (Negri e Machado, 2008), e dados de rádio ocultação por *Global Navigation Satellite System* (GNSS), os quais fornecem em alta resolução vertical informações da atmosfera terrestre (Baños *et al.*, 2018). Os dados de radiação utilizados foram os coletados pelo sensor AMSU-A a bordo dos satélites Metop-A, NOAA-15, NOAA-18 e NOAA-19. O período escolhido para os experimentos foi o compreendido entre 1° de janeiro a 1° de fevereiro de 2013, sendo um processo cíclico no qual os dados foram assimilados nos horários sinóticos do respectivo período (00, 06, 12 e 18 UTC).

Os satélites da série NOAA e o satélite Metop-A possuem um período orbital que varia entre 101 e 102 min. Desta forma, o sensoriamento remoto é realizado ao redor de todo planeta 14 vezes por dia, aproximadamente. Portanto, como a janela de assimilação utilizada neste experimento é de 6 h (com um intervalo de 3 h entre os horários sinóticos), em cada ciclo a área do globo é varrida pelo sensor pouco menos de 4 vezes.

A seleção de canais utilizada neste experimento foi a mesma sugerida pelo DTC, na distribuição do GSI (DTC,



2016), na qual alguns canais são desligados por problemas no sensor, como é o caso do canal 14 (que é desligado em todos os satélites), como os canais 07 e 08 que são desligados em alguns satélites e os canais de superfície (01, 02, 03 e 15) que foram desligados no NOAA-19. A seleção adequada dos canais ainda é um processo em estudo que requer avaliações adicionais na interação com o modelo e no que se refere a assimilação de dados em modelos de processos na superfície terrestre para os canais sensíveis à superfície.

#### 2.4. Método de avaliação dos resultados

A contribuição dos dados de radiância no processo de assimilação foi avaliada nesse estudo através de um levantamento da distribuição espacial dos dados disponíveis, e posteriormente por séries temporais dos dados filtrados no controle de qualidade, e finalmente assimilado no processo dentro de todo o período avaliado. Em um segundo estágio é feita uma avaliação dos dados no que se refere ao impacto no processo de assimilação explorando as medidas *Observation Minus Forecast* (OMF) e *Observation Minus Analysis* (OMA). A relação entre o OMF e o OMA indica o quanto a *first-guess* e a análise, respectivamente, estão próximos da observação. De uma maneira geral, após o processo de assimilação se deseja que os valores do OMA sejam mais próximos de zero do que os valores do OMF, o que indica que o processo de AD desempenhou sua função. Métricas estatísticas, viés, e desvio padrão são explorados nessa análise. Uma comparação dos experimentos com e sem a assimilação de dados de radiância indica a importância destes dados para a qualidade da análise oferecida para o modelo BAM. O impac-

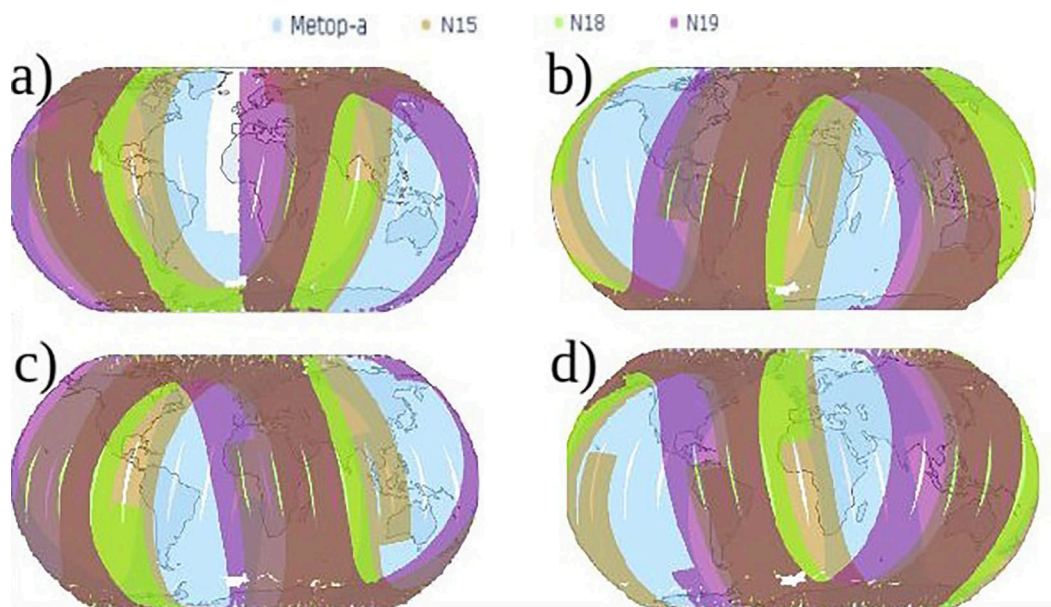
to na assimilação de dados das outras fontes de observação é também avaliado nesse estudo.

Para identificar os locais mais sensíveis no globo onde a utilização de dados de radiância contribuem nos produtos de PNT, campos previstos da altura geopotencial em 500 hPa, temperatura em 850 hPa, componentes zonal em 250 hPa e meridional do vento em 850 hPa, são avaliados.

### 3. Análise dos Resultados

Inicialmente verifica-se que em todos os horários sinóticos a cobertura realizada pelos satélites N15, N18, N19 e Metop-A é bastante densa. Como mostra a Fig. 4 são poucas as áreas do globo que não são visadas pelo sensor AMSU-A a bordo dos satélites citados. O fato da janela de dados no processo de assimilação ser de 6 h, contribui para que a cada passo de assimilação quase que todo o globo tenha pelo menos uma observação de radiância.

Há dois fatores a serem destacados na Fig. 4 no que se refere a cobertura de dados: um primeiro, circunstancial e outro, de ocorrência contínua. O primeiro são áreas do globo que não possuem cobertura em um horário específico. Observa-se a ocorrência desse problema no tempo 00Z nesse dia, em que a costa oeste da África não é coberta por nenhum dos quatro satélites, o que não é observado em outros dias do experimento nesta região. O segundo, refere-se a falhas na coleta de dados em forma de feixes longitudinais próximos a linha do equador, formados por falhas entre uma passagem e outra dos mesmos satélites. Quando há a superposição de passagens de dife-



**Figura 4** - Cobertura espacial dos satélites Metop-A (azul), N15 (dourado), N18 (verde) e N19 (roxo), para o sensor AMSU-A em seus diferentes horários sinóticos para o dia 20130107.

rentes satélites, esse problema não configura uma região não coberta. Como ambos fatores ocorrem de forma eventual, esses não caracterizam um padrão de região sem observação que poderia impactar negativamente no processo de assimilação de dados.

### 3.1. Evolução da assimilação dos dados de radiação durante o processo de AD

Com a grande quantidade de informações disponíveis advindas das observações de radiação, há também a ocorrência de redundância que impacta negativamente na eficiência do processo, a qual deve ser minimizada. No GSI há diversos meios de selecionar a base de dados que de fato deve ser assimilada. O *thinning* é o processo responsável pelo maior corte de observações, visto que ele visa descartar as observações em que há sobreposição da região amostrada pelo sensor, conseqüentemente visa diminuir a correlação espacial entre as observações e seus erros, contribuindo para a eficiência do método. O efeito desse processo pode ser verificado na Fig. 5 a que apresenta o comportamento dos dados observados do sensor AMSU-A durante o período em que foram realizados os experimentos. A série temporal mostra que o total de dados disponibilizados pela soma dos quatro satélites (linha azul) é quase 5 milhões de observações a cada ciclo de assimilação. Essa figura indica o quanto o processo de *thinning* (linha laranja) reduz o número de dados disponíveis no processo de assimilação. Na Fig. 5b é apresentado um esquema ilustrativo do efeito de sobreposição, que tem uma relação direta com o ângulo de inclinação do ponto visado pelo sensor, o qual o processo *thinning* tende a minimizar. Há outros filtros que: (a) excluem as observações em que os canais principais são ruins; (b) seleciona observações que tenham um número maior de canais bons; (c) descarta observações fora do

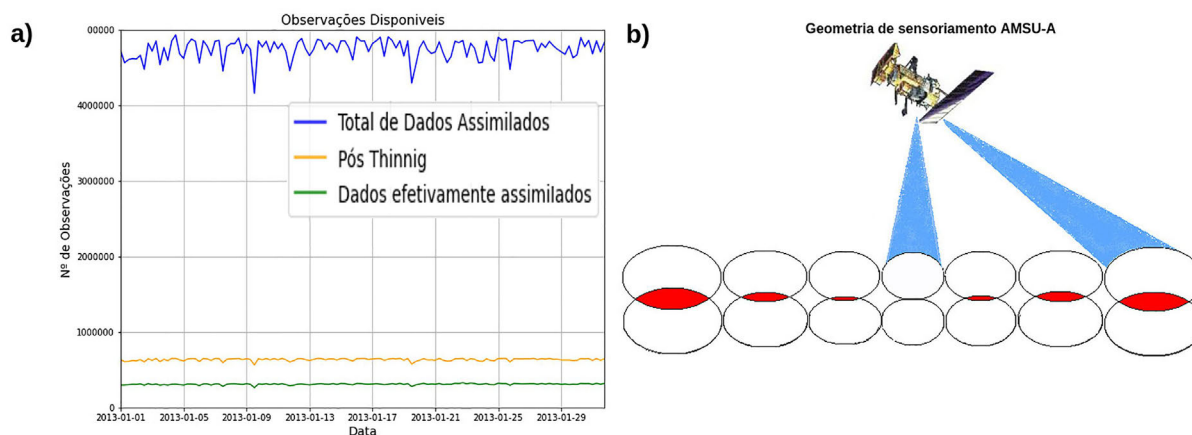
domínio do modelo; (d) seleciona observações que estejam em superfícies que permitam uma melhor estimativa do perfil, (e) seleciona as observações a partir de um preditor de controle de qualidade. Depois desse processo, somente algo entre 5% e 10% das observações disponíveis dão início ao processo de minimização (linha verde). Essa seleção criteriosa das observações evidencia a necessidade de se ter uma cobertura ampla e densa sobre todo o globo como a realizada pelo AMSU-A.

#### 3.1.1. Controle de qualidade

Depois de realizada a filtragem inicial com o *thinning* e outros filtros, executa-se o processo de controle de qualidade dinâmico das observações dentro do processo de minimização da função custo.

O controle de qualidade pode ser o passo mais importante da assimilação de dados de radiação, visto que este processo exige uma coerência entre a quantidade e a qualidade das observações. Desta forma, pode-se pensar no controle de qualidade como um processo de extensão do *thinning*, contudo, destinado a barrar dados por problemas de sensoriamento, erros de simulação de nuvens, erros de simulação de emissividade de superfície e erros de processamento. As rotinas de controle de qualidade são divididas por instrumento de observação, havendo os índices gerais de controle de qualidade e os índices específicos para cada instrumento de sensoriamento, conforme pode-se verificar na Tabela 1.

A Fig. 6 mostra as séries temporais dos dados efetivamente assimilados durante o período dos experimentos (linhas azuis) ao compor a análise para o AMSU-A em cada um dos satélites. A figura mostra também a quantidade de dados inicialmente disponíveis no início do processo de minimização (linhas laranjas). A linha verde da



**Figura 5** - (a) Total de dados do Metop-A e dos satélites da série NOAA disponibilizados ao GSI (azul), total de dados do Metop-A e dos satélites da série NOAA que permanecem no processo de assimilação após o *thinning* (laranja) e total de dados do Metop-A e dos satélites da série NOAA disponíveis no início do processo de minimização (verde). (b) Ângulo de varredura para um *scanner cross-track* que varia conforme o instrumento aponta para longe do nadir, resultando em um sensoriamento que cresce em direção à borda de uma faixa de varredura, o que se traduz em resolução espacial degradada em ângulos de varredura mais amplos.

**Tabela 1** - Índice de controle de qualidade implementados no GSI para assimilação de radiância.

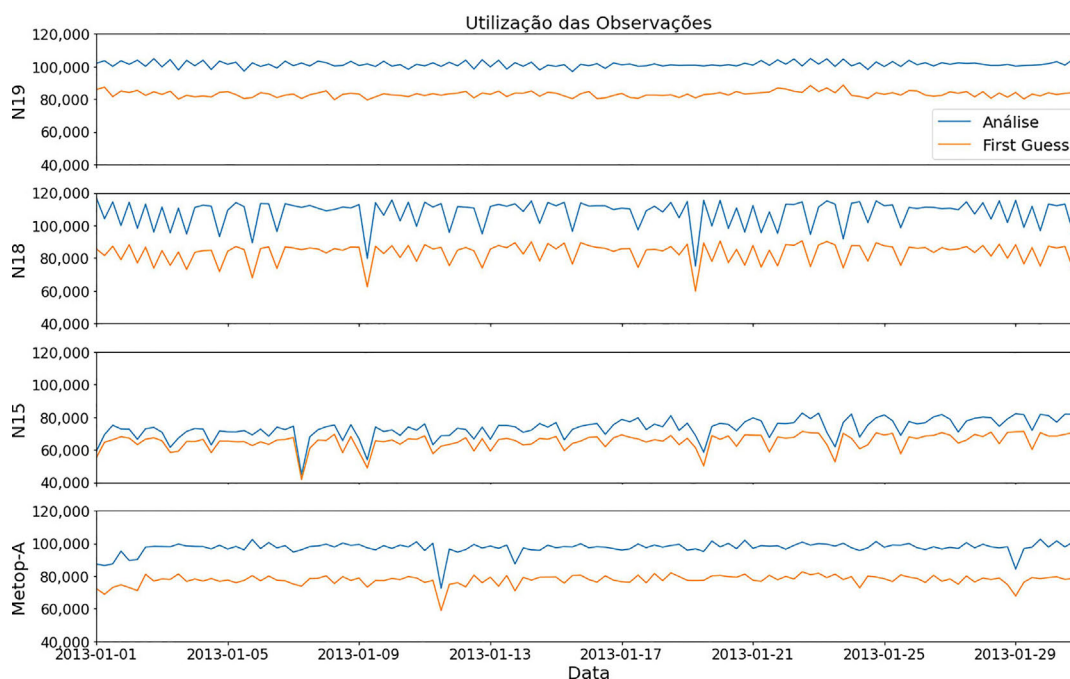
Índices gerais	Descrição
1	Inconformidade na subrotina radinfo.
2	Falha no CRTM.
3	Falha grosseira de verificação.
4	Verificação de intercâmbio de canais.
5	Utilização de canais apenas sobre determinada superfície.
6	Verificação na rotina de controle de qualidade específica.
7	Efeito de nuvem excedente para o limite do canal na rotina de controle de qualidade.
8	Estimativa imprecisa da emissividade/temperatura da superfície na rotina de controle de qualidade.
9	Observações fora do intervalo na rotina de controle de qualidade.
Índices específicos	Descrição
50	Presença de nuvens associado ao índice de espalhamento
51	Presença de nuvens associado ao volume água na nuvem

Fonte: *Shao et al. (2016)*.

Fig. 5 é a soma dos valores das linhas laranjas da Fig. 6. A diferença observada entre as séries temporais da Fig. 6 é a quantidade de dados incluídos durante a minimização. O aumento no número de dados assimilados que compõem a análise em relação ao número assimilado no início do processo de minimização pode ser explicado pelo fato de que o estado do modelo durante a minimização se aproxima dos dados observados, de modo que os dados do estado do modelo anteriormente rejeitados, por serem muito discrepantes, passem a ser assimilados.

Algo relevante a ser pontuado é que todos os instrumentos de sensoriamento remoto estão sujeitos ao pro-

cesso de degradação, como se verifica no sensor AMSU-A do satélite NOAA-15. Lançado em 13 de maio de 1998, esse satélite é o mais antigo entre os 4 instrumentos avaliados. O satélite NOAA-19 é o mais recente dentre estes, lançado em 2009, enquanto que os demais entraram em funcionamento entre os anos de 2005 e 2006. O fator tempo de vida útil dos satélites é claramente observado na Fig. 6 quanto a quantidade dos dados assimilados. Observa-se que o satélite NOAA-19 apresenta uma regularidade de funcionamento no período compreendido deste estudo e que, assim como o NOAA-18, apresenta um número elevado de observações utilizadas em relação aos demais



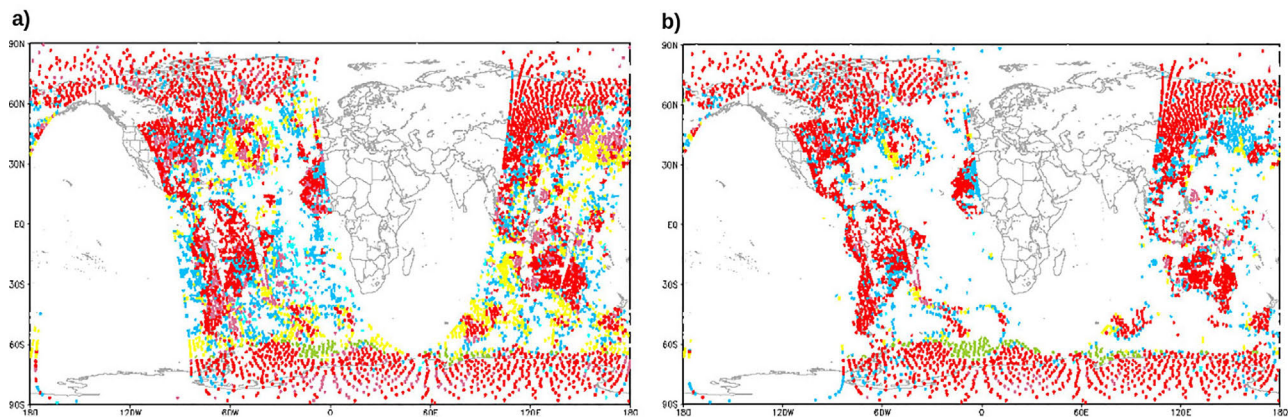
**Figura 6** - Total de observações utilizadas na obtenção da análise para os satélites Metop-A, N15, N18 e N19 (azul) e total de observações utilizadas no *first-guess* para os satélites Metop-A, N15, N18 e N19 (laranja).

instrumentos, sendo a média de dados assimilados, aproximadamente, 106.000 observações e 103.000 observações, respectivamente. O NOAA-15 apresentou além de uma menor quantidade de dados disponíveis (em torno de 60.000), uma menor quantidade de dados incluídos (diferença entre as linhas laranja e azul) durante o processo de minimização.

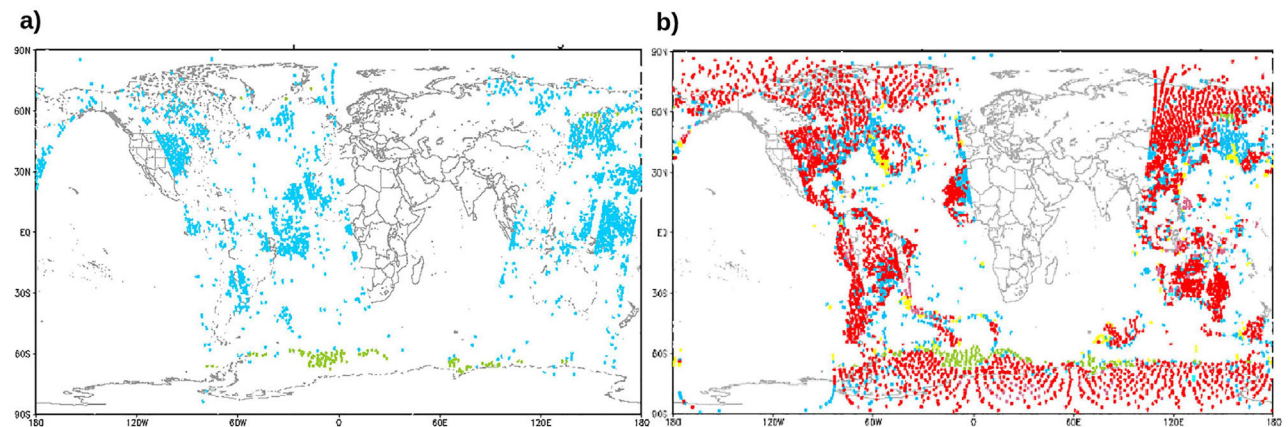
Para avaliar espacialmente o resultado do processo de controle de qualidade durante a minimização da função custo, a Fig. 7(a) mostra distribuição espacial dos dados rejeitados do canal 1 do sensor AMSU-A, embarcado no satélite N18, no início do processo de minimização, denominado *first-guess*, ao aplicar o controle de qualidade do GSI, enquanto a Fig. 7(b) mostra a distribuição espacial destes dados ao final do processo de minimização, este chamado de *análise*, ao aplicar o controle de qualidade do GSI. Essa figura mostra que a grande maioria dos dados

incluídos durante o processo estão sobre regiões oceânicas.

Esse padrão de rejeição/inclusão não é o mesmo para os diferentes canais. Para verificar isso, a Fig. 8 apresenta distribuição espacial dos dados rejeitados entre dois canais, um de superfície e um outro canal de sondagem. Nessa figura os dados do canal 9 do sensor AMSU-A no satélite NOAA-18 rejeitados na composição final da análise (Fig. 8(a)) e a disposição espacial dos dados do canal 1 do sensor AMSU-A no satélite N18 (Fig. 8(b)) são apresentados. Ao analisar especificamente a rejeição dos dados de um canal de superfície, notam-se as dificuldades que o sensoriamento de níveis verticais próximos à superfície apresenta. Como abordado anteriormente, além das dificuldades na trajetória da onda ao atravessar a atmosfera, provocando erros grosseiros de OMF e OMA, há outros problemas que podem afetar o processo como os erros



**Figura 7** - Distribuição espacial dos dados rejeitados do canal 1 do sensor AMSU-A, embarcado no satélite N18 para o horário 2013011118. (a) refere-se aos dados rejeitados no início do processo de minimização ao comparar com o *first-guess* e (b) refere-se aos dados rejeitados no final desse processo ao comparar com a análise obtida. Destaca-se que cada cor de observação rejeitada é referente a um índice do controle de qualidade implementado no GSI, sendo azul para rejeição por diferença considerável entre observação e simulação, rosa para rejeição por presença de nuvens considerando o índice de espalhamento, vermelho para rejeição por presença de nuvens considerando o volume de água na nuvem, o verde para rejeição para efeito das nuvens maior que o permitido pelo canal e amarelo para imprecisão na estimativa da emissividade.



**Figura 8** - (a) Refere-se à distribuição espacial dos dados da análise rejeitados do canal 9 do sensor AMSU-A, embarcado no satélite N18 para o horário 2013013118. (b) Refere-se à disposição espacial dos dados da análise rejeitados do canal 1 do sensor AMSU-A, embarcado no satélite N18 para o horário 2013013118. As cores se referem aos mesmos flags de controle de qualidade descritos na figura.

provocados pela presença de nuvens nos canais de mais baixos níveis, pode-se verificar também que ocorrem erros devido a imprecisão de estimar a emissividade, entre outros. Desta forma, verifica-se um alto número de observações rejeitadas, nos canais de superfície.

### 3.2. Impacto dos dados na qualidade da análise

A avaliação da qualidade da análise pode ser acessada verificando o quanto o estado do modelo se aproxima das observações (OMA) levando em consideração a distância entre o *first-guess* e as mesmas observações (OMF). A Fig. 9 apresenta a média global do OMA (linha azul) e do OMF (linha laranja) das radiancias do sensor AMSU-A no satélite N19, em diferentes níveis da atmosfera: a baixa atmosfera (Canal 4), a média atmosfera (Canal 10) e a alta atmosfera (Canal 13).

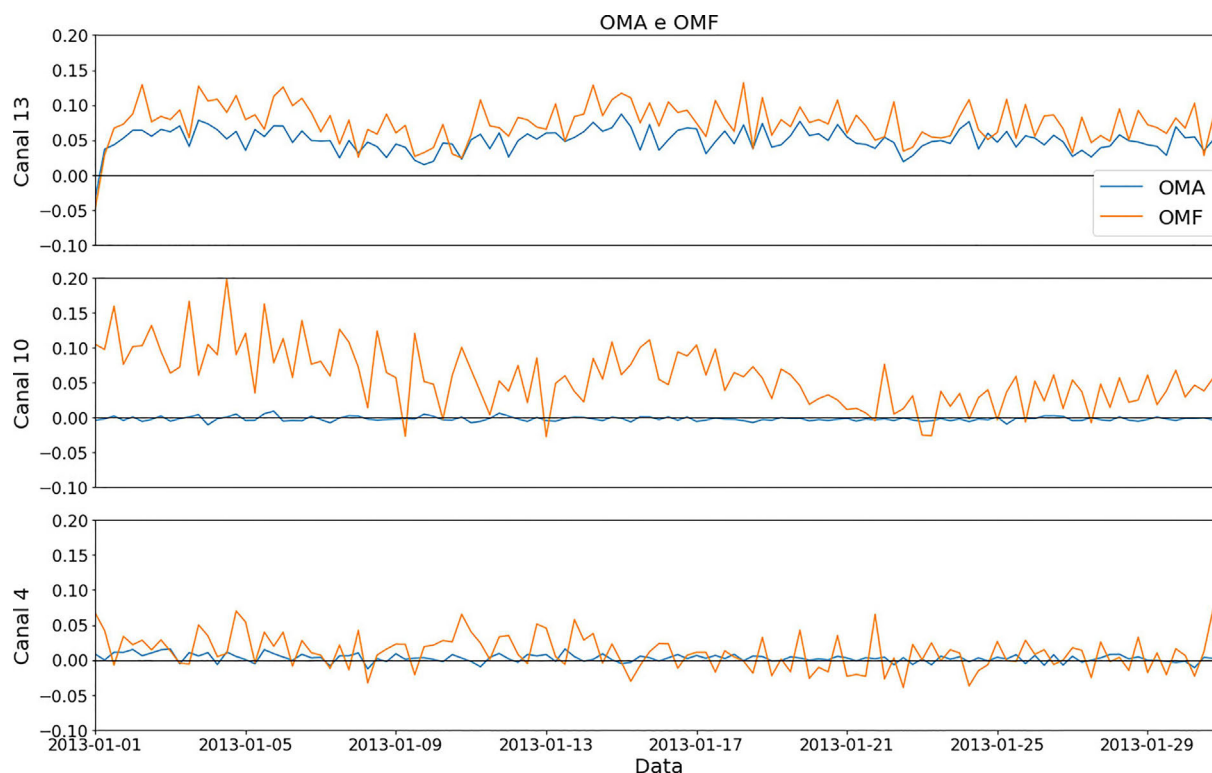
O sensor nesse satélite foi escolhido entre os demais satélites, pois é o instrumento mais novo, além de apresentar os melhores resultados em relação a estabilidade e apresentar bons resultados na quantidade de observações coletadas e assimiladas.

Note que independente da magnitude da diferença e dos canais avaliados, seja na alta, na média ou na baixa atmosfera, todos os gráficos demonstram que, após o passo de assimilação, os dados de análise estão mais próximos do estado médio da observação, o que indica que o processo de assimilação está sendo eficaz em minimizar os erros da análise obtida. Destaca-se também que este comporta-

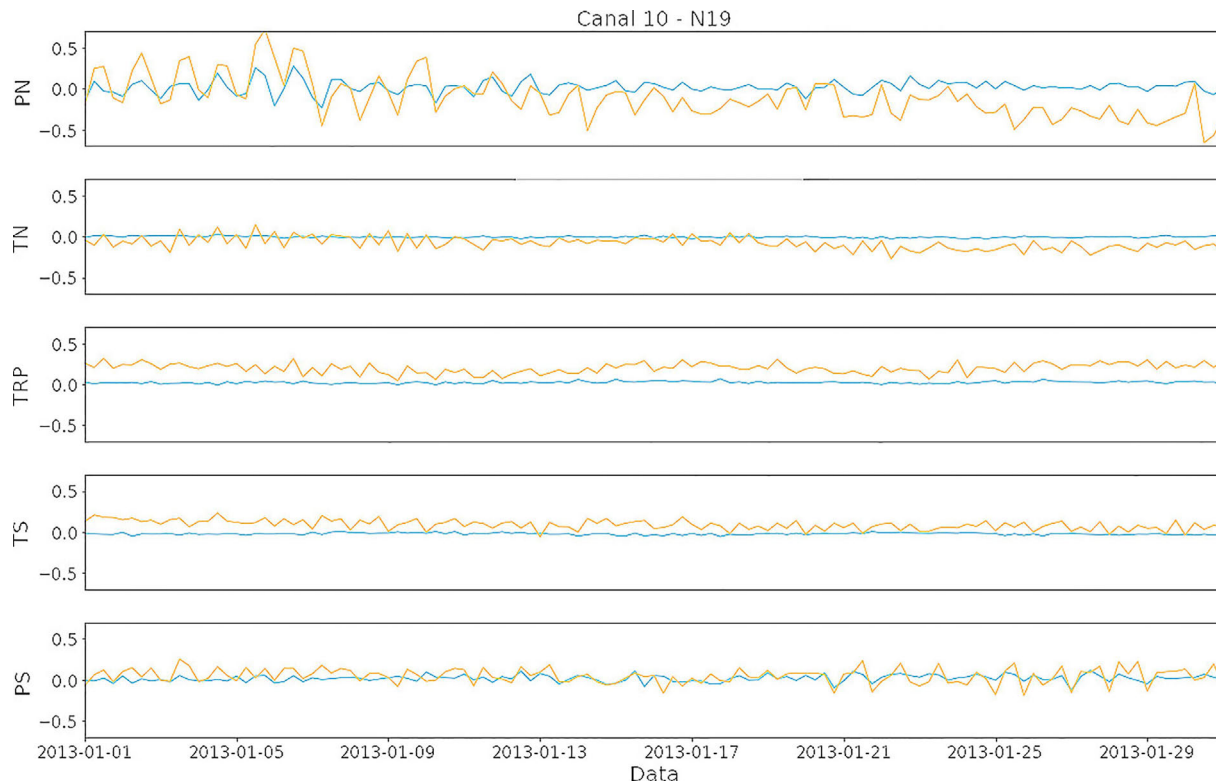
mento foi apresentado em todos os canais, de todos os satélites, variando a magnitude da diferença, entretanto, sempre apresentando valores de OMA mais próximos do zero do que os valores de OMF. Em relação aos diferentes canais avaliados, verificou-se que nos canais mais distantes do topo de modelo e da superfície apresentam melhores resultados. Verifica-se que no canal 10 os valores da diferença entre observação e análise são mais próximos a zero do que o observado nos canais 04 e 13.

Visando avaliar em que faixas do globo a assimilação de dados apresenta melhores resultados, foram selecionadas cinco faixas latitudinais, nas quais analisou-se o comportamento do OMF médio e do OMA médio. As Faixas são: zona Polar Sul (PS) com intervalo entre  $-90^\circ$  e  $-80^\circ$ ; zona Temperado Sul (TS) com intervalo entre  $-80^\circ$  e  $-20^\circ$ ; zona Tropical (TRP) com intervalo entre  $-20^\circ$  e  $20^\circ$ ; zona Temperada Norte (TN) com intervalo entre  $20^\circ$  e  $80^\circ$ ; zona Polar Norte (PN) entre  $80^\circ$  e  $90^\circ$ . A Fig. 10 mostra esses resultados para o canal 10 do AMSU-A no satélite NOAA-19. Esse canal foi escolhido em função dos bons resultados apresentados na avaliação temporal (Fig. 9).

De maneira geral, os autores consideram que a assimilação aqui apresentada apresenta um bom desempenho em todas as faixas latitudinais. Vê-se que os resultados do índice OMA são melhores do que os de OMF. Contudo, deve-se destacar dois aspectos importantes, como segue. Primeiro, verifica-se na Fig. 10 que o desempenho da



**Figura 9** - OMA (azul) e OMF (laranja) para os canais 4, 10 e 13, respectivamente baixos, médios e altos níveis da atmosfera, do satélite N19.



**Figura 10** - OMA médio (azul) e OMF médio (laranja) para o canal 10 do satélite N19 e representação geográfica em diferentes faixas latitudinais. A zona Polar do Sul (PS) possui intervalo entre  $90^\circ$  e  $-80^\circ$ , zona Temperada Sul (TS) com intervalo entre  $-80^\circ$  e  $-20^\circ$ ; zona Tropical (TRP) com intervalo entre  $-20^\circ$  e  $20^\circ$ ; zona Temperada Norte (TN) com intervalo entre  $20^\circ$  e  $80^\circ$ ; zona Polar Norte (PN) entre  $80^\circ$  e  $90^\circ$ .

assimilação (OMA) está diretamente associado com a qualidade do *first-guess*, quantificado pelo OMF. Isso é evidente nos primeiros 10 dias na zona Polar Norte, onde os valores de OMF são instáveis e altos, em comparação com as demais faixas, a assimilação não obtém resultados tão eficientes quanto nas demais áreas. Segundo, observa-se clara evolução e melhoria do sistema no decorrer do período, explorando o processo cíclico de assimilação. Isto se deve ao fato de que a condição inicial é aprimorada pela assimilação dos dados de radiação e, assim, também o são os resultados das previsões geradas. Consequentemente, estas geram melhores *firsts-guess* para a continuidade do ciclo de assimilação. Desta forma, todo o sistema é retroalimentado com estados atmosféricos com menores incertezas a cada passo do ciclo. Isto é melhor observado na Fig. 11a, que apresenta o contraste entre os valores de média e desvio padrão do OMA entre a zona PS e a zona PN para o canal 10 do satélite NOAA19.

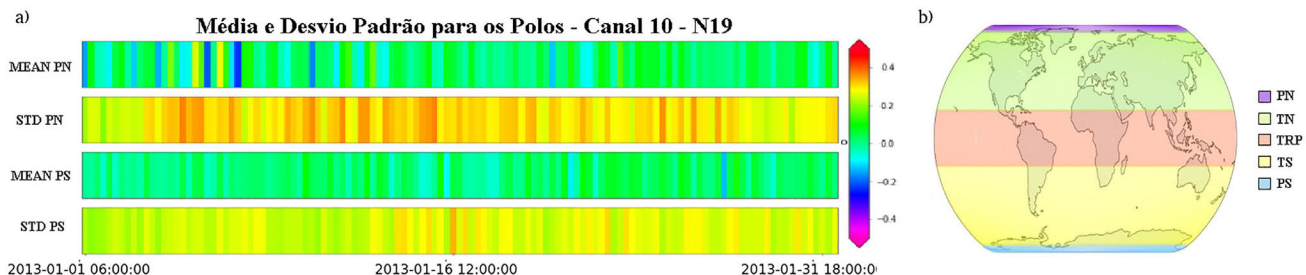
Ao analisar a Fig. 11a, verifica-se que os valores de média do OMA da zona Polar Norte são altos e possuem um comportamento alternado variando sua magnitude em valores positivos e negativos. O desvio padrão desta área atinge seu maior valor na primeira metade do período analisado. Contudo, verifica-se que ao transcorrer do processo de AD tanto a média, quanto o desvio padrão, da zona PN atingem, ao fim do processo, valores similares aos valores

visualizados na zona PS, evidenciando a contribuição da AD e seus aspectos de melhoria durante o transcorrer do processo para obtenção de uma análise de qualidade nessa região do globo.

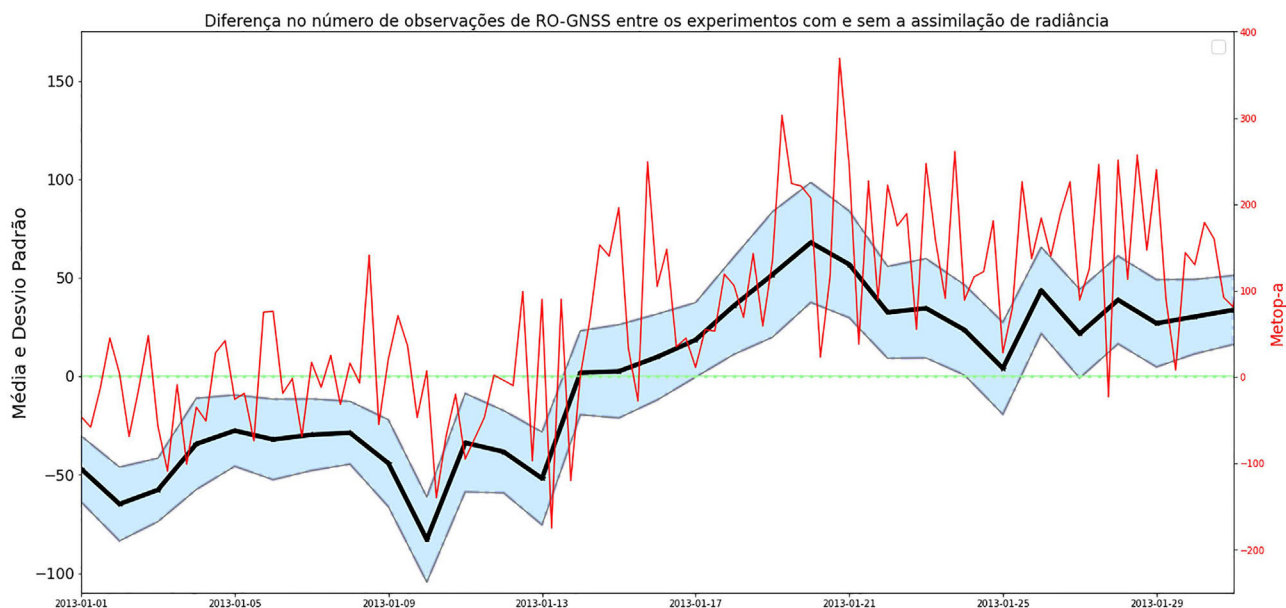
### 3.3. Impacto dos dados de radiação na assimilação de dados de outras fontes

Conforme explanado na Seção 2.1., sabe-se que a utilização dos dados de radiação no processo de AD implica em uma melhora da qualidade do estado analisado e consequentemente, impacta no aproveitamento dos dados de outras fontes de observação. Para evidenciar esse aspecto positivo da assimilação de dados de radiação, a Fig. 12 apresenta a estatística da assimilação de dados de Rádio Ocultação GNSS nos experimentos com e sem a assimilação de dados de radiação, já descritos na Seção 2.3.2.

A Fig. 12 pode ser observado que ao assimilar os dados de radiação existe uma tendência negativa nos primeiros dias do mês indicando que uma menor quantidade de dados de refratividade são assimilados. Com a ausência da radiação, os dados de rádio ocultação passam a ser os mais abundantes e dominantes e por isso são assimilados em uma maior quantidade. Contudo, depois de alguns dias com a assimilação de dados de radiação essa tendência negativa passa a ser positiva e um maior número de dados



**Figura 11** - (a) Ilustração visual da evolução temporal da média e desvio padrão do OMA calculado para a zona Polar Norte (80° e 90°) e a zona Polar Sul (−80° e −90°) para o satélite N19, sensor AMSU-A, canal 10. (b) Representação geográfica das faixas latitudinais deste estudo.



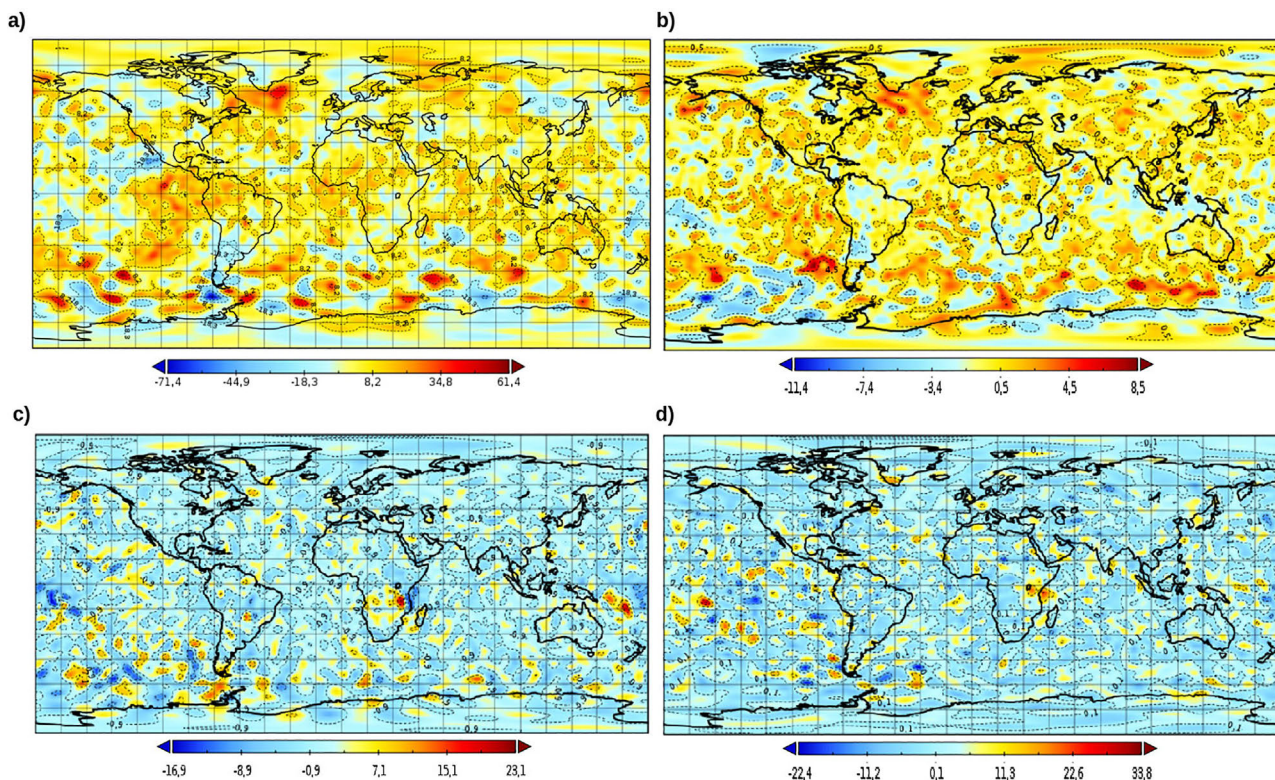
**Figura 12** - Série temporal da média diária (linha preta) e desvio padrão (hachurado azul) da diferença na quantidade de dados de refratividade advindos da Rádio ocultação GNSS assimilados nos experimentos com e sem a assimilação de dados de radiância para o mês de Janeiro de 2013. A linha vermelha é a diferença da quantidade de dados de refratividade do Metop-A assimilados em ambos experimentos.

de rádio ocultação é assimilado. A medida que o ciclo de assimilação avança no tempo, uma maior quantidade de dados de radiância é assimilada e com o processo cíclico os estados do modelo são aprimorados e as análises são consequentemente melhores (mais próximas da atmosfera real observada). Em consequência disso, mais observações são assimiladas, em todas as diferentes bases de dados. Ou seja, os dados de refratividade são impactados positivamente com o aumento do número de ciclos de assimilação quando são incluídas as radiâncias advindas do AMSU-A. Esse padrão de impacto negativo para positivo ocorre aproximadamente no ciclo 52 (1800 UTC do dia 12 de janeiro) onde se observa uma tendência a assimilar mais dados de refratividade que no experimento controle. Isso é um indicativo claro do impacto positivo na quantidade de dados aceitos pelo GSI quando são incluídos os dados de radiância, sinalizando para a importância desses dados

dentro do sistema complementando o uso dos dados disponíveis.

### 3.4. Análise do produto da previsão numérica de tempo

Nesta seção será abordado a contribuição dos dados de observação de radiância no processo de assimilação de dados. Para isto, serão utilizados os resultados das previsões geradas pelo modelo a partir das análises dos experimentos com e sem a assimilação de radiâncias, já descritos na Seção 2.3.2. Para isso a Fig. 13 mostra os campos de diferença entre as previsões de 6 h das rodadas com e sem a assimilação de radiância para a altura geopotencial em 500 hPa, temperatura em 850 hPa, componentes zonal em 250 hPa e meridional do vento em 850 hPa. O objetivo desta comparação não é qualitativo, mas sim identificar os locais mais sensíveis do globo onde a utilização de dados de radiância contribuem nos produ-



**Figura 13** - Campos das diferenças das previsões de 6 h obtidas com e sem a assimilação de dados de radiação para: (a) altura geopotencial a 500 hPa (m), (b) temperatura do ar a 850 hPa (K), (c) componente meridional V do vento a 850 hPa (m/s), (d) componente zonal U do vento a 250 hPa (m/s).

tos de PNT obtidos com o SMG. Estudos mais completos sobre este tema serão desenvolvidos futuramente para diagnosticar padrões e analisar a contribuição que outros sistemas de observação oferecem ao processo de AD.

Ao analisar a Fig. 13, nota-se que os padrões citados na Seção 2.1. realmente confirmam-se. Se verifica que na faixa latitudinal compreendida entre  $-90^\circ$  e  $-15^\circ$  há uma diferença acentuada em todas as variáveis analisadas, indicando que a utilização dos dados de radiação realmente interfere de maneira substancial na previsão do estado da atmosfera no Hemisfério Sul. Isto pode ser verificado principalmente na Fig. 13a, na área mais ao sul do oceano Pacífico, e na Fig. 13b, no oceano Índico. Entretanto nota-se que há contribuição da radiação nas demais figuras, porém se verifica uma magnitude da diferença mais sutil nas componentes do vento, Fig. 13c e na Fig. 13d. Também, deve-se notar que os campos mostrados já são um resultado de uma advecção horizontal de 6 h que, apesar de provavelmente ser pequena, já existe e, assim, alguns dos centros de maior impacto podem estar deslocados em relação aos dados assimilados 6 h antes, o que deve ser considerado ao avaliar os campos apresentados nessa análise. Diante dos resultados apresentados, pode-se verificar que a utilização dos dados de radiação no processo de assimilação de dados contribui de maneira significativa em locais onde as observa-

ções convencionais são distribuídas de maneira irregular e em pouca quantidade.

#### 4. Conclusões e Recomendações para Trabalhos Futuros

Embora a área de assimilação de dados de radiação seja um vasto campo a ser explorado no Brasil, o número de pesquisadores e consequentemente de trabalhos nessa linha é muito inferior ao ideal exigido para tornar efetivo esse processo. O presente trabalho visa contribuir para difundir essa linha de pesquisa e demonstrar sua importância e as potencialidades dessa base de dados. Para isto se buscou destacar detalhes, funcionamento e trazer informações técnicas do sensor AMSU-A no processo de AD, detalhou-se teoricamente o processo de assimilação de dados dentro do GSI, abordando temas como o controle de qualidade e o processo de minimização das incertezas. Além disso, foi descrito e discutido, de maneira pormenorizada, os resultados de experimentos propostos e analisada a contribuição da assimilação dos dados de radiação na PNT.

Os resultados apresentados neste estudo, permitem afirmar que o sensor AMSU-A, nos diferentes satélites disponíveis atualmente, destaca-se como uma boa ferramenta de observação da Terra, com uma boa cobertura espacial com grande redundância e riqueza de informa-



ções. Essa cobertura e redundância permitem que se explorem métodos rigorosos de controle de qualidade, que embora diminuam significativamente a quantidade de dados ainda possibilitam a assimilação de uma quantidade elevada de dados e simultaneamente minimizar o problema de assimilar dados ruidosos. Pode-se verificar também as particularidades da AD de radiação nos canais do sensor AMSU-A a partir de métodos estatísticos de verificação da qualidade das análises obtidas. Foi observado uma melhoria da análise com a assimilação de dados de radiação com um impacto positivo na assimilação de outras bases de dados, como os da Rádio Ocultação GNSS.

Além de apresentar detalhadamente aspectos da assimilação de dados de radiação e do funcionamento do sistema GSI no CPTEC, principais objetivos deste trabalho, verifica-se que ainda há uma enorme área de conhecimento a ser explorada sobre o tema elementar deste estudo. Conforme já descrito na seção anterior, o próximo passo a ser investigado é avaliar a melhoria na qualidade do produto da previsão com a assimilação de dados de radiação no sistema de modelagem global (SMG) do CPTEC-INPE. Um outro passo é investigar a sensibilidade dos canais do AMSU-A sensíveis à superfície (não utilizados nesse estudo) em conjunto com a assimilação de dados na componente da modelagem dos processos de superfície terrestre já implementada no SMG, mas ainda não validado. Penna *et al.* (2015) mostraram que esses canais apresentam bom potencial para a melhoria das previsões sobre a América do Sul e devem ser explorados. Outros aspectos físicos podem ser explorados como o impacto da assimilação de dados de outros sensores de radiação, como o MHS, HIRS, bem como os hiperespectrais que apresentam mais de 300 canais úteis a assimilação, os quais precisam ser adequadamente configurados, levando em consideração as particularidades do SMG, o que requer mais investigação.

## Referências

- ANDERSON, E.; JÄRVINEN, H. Variational quality control. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 125, n. 554, p. 697-722, 1999.
- ANDREOLI, R.V.; FERREIRA, S.H.S.; SAPUCCI, L.F.; SOUZA, R.A.F.D.; MENDONÇA R.W.B; *et al.* Contribuição de diversos sistemas de observação na previsão de tempo no CPTEC/INPE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 2, p. 218-237, 2008.
- AZEVEDO, H.B.; GONÇALVES, L.G.G.; BASTARZ, C.F.; SILVEIRA, B.B. Observing system experiments in a 3DVAR Data Assimilation System at CPTEC/INPE. **Weather and Forecasting**, v. 32, n. 3, p. 873-880, 2017. Disponível em doi <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/WAF-D-15-0168.1>.
- BANOS, I.H.; SAPUCCI, L.F.; AVANÇO, L.A.; RODRIGUES DINIZ, F.L. Impacto da assimilação de perfis de refratividade do satélite Metop-B nas previsões de tempo do CPTEC/INPE durante os meses de janeiro e agosto de 2014. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, p. 65-81, 2018.
- BASTARZ, C.F. **Assimilação de Dados Híbrida Ensemble-Variacional Global no CPTEC**. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 49 p., 2017. Disponível em <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3P5MHFL>.
- BORMANN, N.; LAWRENCE, H.; FARNAN, J. Global observing system experiments in the ecmwf assimilation system. ECMWF, **Technical Memorandum no. 839**, 2019. Disponível em <https://www.ecmwf.int/node/18859>.
- BURROWS, C. Assimilation of radiance observations from geostationary satellites. ECMWF, **Report. n. 52**, 2020. ISSN 52. Disponível em: <https://www.ecmwf.int/node/19483>. doi.
- CHOU, M.D.; SUAREZ M.J.; LIANG, X.Z.; YAN, M.M.H; COTE, C.; A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies. NASA, **Technical Memorandum ID 20010072848**, 2001. Disponível em <https://ntrs.nasa.gov/citations/20010072848>.
- DINIZ, F.L.; TODLING, R. Assessing the impact of observations in a multi-year reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 727, p. 724-747, 2020.
- D.T.C. **Gridpoint Statistical Interpolation Advanced User's Guide Version 3.5.0.0**, v. 1, 146 p., 2016. Disponível em: <https://dtcenter.org/community-code/gridpoint-statistical-interpolation-gsi/documentation>.
- FIGUEROA, S.N.; BONATTI, J.P.; KUBOTA, P.Y.; GEORG, A.G.. The Brazilian Global Atmospheric Model (BAM). Performance for Tropical Rainfall forecasting and sensitivity to convective scheme and horizontal resolution. **Weather and Forecasting. American Meteorological Society**, v. 31, n. 5, p. 1547-1572, 2016. Disponível em [https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/31/5/waf-d-16-0062\\_1.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/31/5/waf-d-16-0062_1.xml).
- FOLEY, J.; KUCHARIK, C.; POLZIN, D. **Integrated Biosphere Simulator Model (IBIS)**, Version 2.5. ORNL Distributed Active Archive Center, 2005. Disponível em [http://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsviewer.pl?dsi\\_d=808](http://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsviewer.pl?dsi_d=808).
- HARRIS, B.A.; KELLY, G.A. satellite radiance-bias correction scheme for data assimilation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 127, n. 574, p. 1453-1468, 2001. Disponível em <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.49712757418>.
- IDE, K.; COURTIER, P.; GHIL, M. LORENC, A.C. Unified notation for data assimilation: Operational, sequential and variational (gt special issue It data assimilation in meteorology and oceanography: Theory and practice). **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 75, n. 1B, p. 181-189, 1997.
- KALNAY, E. **Atmospheric Modeling, Data Assimilation, and Predictability**, v. 54. p. 341, 2003. Disponível em [http://www.meteoclub.gr/proo1/Atmospheric\\_modeling\\_data\\_as\\_simulation\\_and\\_predictability.pdf](http://www.meteoclub.gr/proo1/Atmospheric_modeling_data_as_simulation_and_predictability.pdf).
- KELLY, G.; THÉPAUT, J.N.; BUIZZA, R.; CARDINALI, C. The value of observations. i: Data denial experiments for the atlantic and the pacific. **Quarterly Journal of the**

- Royal Meteorological Society**, v. 133, n. 628, p. 1803-1815, 2007.
- KIM, J.-H.; KANG, J.-H.; LEE, S. A comparison of observed and simulated brightness temperatures from two radiative transfer models of RTTOV and CRTM. **Journal of the Korean Earth Science Society**, v. 35, n. 1, p. 19-28, 2014.
- KLEIST, D.T.; PARRISH, D.F.; DERBER, J.C.; TREADON, R.; WU, W.S.; *et al.* Introduction of the gsi into the ncep global data assimilation system. **Weather and Forecasting, American Meteorological Society**, v. 24, n. 6, p. 1691-1705, 2009. Disponível em [https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/24/6/2009waf2222201\\_1.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/24/6/2009waf2222201_1.xml).
- KUBOTA, P.Y. **Variabilidade da Energia Armazenada na Superfície e o Seu Impacto na Definição do Padrão de Precipitação na América do Sul**. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 309 p., 2012. Disponível em <http://mtc-m16d.sid.inpe.br/ibi/8JMKD3MGP7W/3CCP5R2>. Acesso em 16 de maio de 2022.
- KUTTY, G.; WANG, X. A comparison of the impacts of radiosonde and AMSU radiance observations in GSI based 3DEnsVar and 3DVar data assimilation systems for NCEP GFS. **Advances in Meteorology**, v. 2015, p. 1-17, 2015.
- LIOU, Y.A. **An Introduction to Atmospheric Radiation**. Amsterdam: Academic Press, 2002.
- MCNALLY, T. Observing system experiments to assess the impact of possible future degradation of the Global Satellite Observing Network. ECMWF, **Technical memorandum no. 672**, 2012.
- MORRISON, H.; THOMPSON, G.; TATARSKII, V. Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment schemes. **Monthly Weather Review**, v. 137, n. 3, p. 991-1007, 2009. Disponível em <https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwr/137/3/2008mwr2556.1.xml>.
- NEGRI, R.G.; MACHADO, L.A.T. Estimativa do vento para os baixos níveis utilizando imagens dos canais visível e infravermelho próximo 3.9  $\mu\text{m}$ . **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 2, p. 206-218, 2008.
- PARK, S.; BRETHERTON, C.S. The university of washington shallow convection and moist turbulence schemes and their impact on climate simulations with the community atmosphere model. **Journal of Climate American Meteorological Society**, v. 22, n. 12, p. 3449-3469, 2009. Disponível em <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/22/12/2008jcli2557.1.xml>.
- PENNA, B.R.; GONÇALVES, L.G.G.D.; SOUZA, S.S.D. Avaliação da temperatura de brilho nos canais sensíveis à superfície terrestre no sistema G3DVAR do CPTEC/INPE: Série NOAA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 3, p. 340-350, 2015.
- RABIER, F.; LIU, Z. Variational data assimilation: theory and overview. In: **Proc. ECMWF Seminar on Recent Developments in Data Assimilation for Atmosphere and Ocean**, Reading, p. 29-43, 2003.
- RODGERS, C.D. **Inverse Methods for Atmospheric Sounding Theory and Practice**. Singapore: World Scientific Publishing, 2000.
- SAPUCCI, L.F.; BASTARZ, C.F.; MATTOS, J.G.Z.; BANOS, I.H.; EICHHOLZ, C.; *et al.* **Avaliação Diagnóstica da Evolução do SMG (versão 2.1.0)**. 2018. Disponível em <http://mtc-m21c.sid.inpe.br/rep/8JMKD3MGP3W34R/3TAMPU2?ibiurl.backgroundlanguage=pt-BR>.
- SAUNDERS, R.; HOCKING, J.; TURNER, E.; RAYER, P.; RUNDLE, D.; *et al.* An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12). **Geoscientific Model Development**, v. 11, n. 7, p. 2717-2737, 2018.
- SHAO, H.; DERBER, J.; HUANG, X.Y.; HU, M.; NEWMAN, K.; *et al.* Bridging research to operations transitions: Status and plans of community GSI. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 97, n. 8, p. 1427-1440, 2016.
- SILVEIRA, B.B. **A Emissividade da Superfície Continental em Micro-Ondas e Suas Implicações na Assimilação de Radiações**. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.
- TALAGRAND, O. Assimilation of observations, an introduction (gt special issue data assimilation in meteorology and oceanography: Theory and practice). **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 75, n. 1B, p. 191-209, 1997.
- TARASOVA, T.A.; FOMIN, B.A. Solar radiation absorption due to water vapor: Advanced broadband parameterizations. **Journal of Applied Meteorology, American Meteorological Society**, v. 39, n. 11, p. 1947-1951, 2000. Disponível em [https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/39/11/1520-0450\\_2000\\_039\\_1947\\_srادتw\\_2.0.co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/39/11/1520-0450_2000_039_1947_srادتw_2.0.co_2.xml).
- ZAPOTOCNY, T.H.; JUNG, J.A.; LE MARSHALL, J.F.; TREADON, R.E. A two-season impact study of four satellite data types and rawinsonde data in the ncep global data assimilation system. **Weather and Forecasting**, v. 23, n. 1, p. 80-100, 2008.