



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ANÁLISE DOS CAMPOS DE VENTO ESTIMADOS A PARTIR DE SATÉLITES GEOESTACIONÁRIOS UTILIZANDO OS CANAIS VISÍVEL E INFRAVERMELHO PRÓXIMO NO CPTEC/INPE

Alessandro Costa Melo

Relatório Final de Iniciação Científica
do programa PIBIC, orientada pelo Dr.
Renato Galante Negri.

INPE
Cachoeira Paulista, SP
31 de agosto de 2020

RESUMO

Este trabalho analisou estatisticamente os campos de vento, gerados operacionalmente no CPTEC/INPE, a partir de sequências de imagens do sensor Advanced Baseline Imager (ABI) a bordo do satélite geoestacionário GOES-16. Conhecer as deficiências desse dado auxilia na compreensão dos impactos desse dado no processo de assimilação de dados ou no seu uso para o monitoramento do tempo e em nowcasting. Estes dados de vento foram comparados com re-análises do NCEP e radiossondagens. O processo de verificação estatística envolveu o uso de ferramentas desenvolvidas nas linguagens Fortran, Korn Shell Script e Python além de trabalhar com a ferramenta de manipulação de dados de geociências GrADS (Grid Analysis and Display System). Este trabalho apresenta os resultados da análise referente ao período de janeiro a dezembro de 2019.

Palavras-chave: Reanálises. GOES-16. AMVs.

ANALYSIS OF THE ESTIMATED WIND FIELDS FROM GEOSTATIONARY SATELLITES USING THE VISIBLE AND NEAR INFRARED CHANNELS IN CPTEC/INPE

ABSTRACT

This essay statistically analyzed the wind fields, operationally generated in CPTEC/INPE by image sequences from the Advanced Baseline Imager (ABI) sensor aboard of the GOES-16, a geostationary satellite. Acknowledge the data gaps, helps to understand the impacts of this data in the assimilation process or in its use to monitor the weather and nowcasting. These wind data were compared to re-analyzes from NCEP and radar apparatus. The process of statistic verification, involved the use of tools developed in different programming languages as Fortran, Korn Shell Script e Python besides working with the data manipulation tool of geosciences GrADS (Grid Analysis and Display System). The period analyzed from January to December 2019.

Keywords: Reanalysis. GOES-16. AMVs.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 3.1 – O espectro eletromagnético.	4
Figura 3.2 – Regiões do espectro eletromagnético.	5
Figura 3.3 – Comparação GOES-R SERIES ABI vs Corrente GOES.	6
Figura 3.4 – Exemplo de um campo de vento obtido a partir do canal 10.3 μm . 9 (Infravermelho janela) do satélite GOES-16.	9
Figura 3.5 – Exemplo de um campo de vento obtido a partir do canal 6.2 μm (vapor d'água) do satélite GOES-16.	9
Figura 4.1 – Diferença vetorial média do vento em 2018 e em 2019.	16
Figura 4.2 – RMSE para os anos de 2018 e 2019.	16
Figura 4.3 – Diferença vetorial no mês de maio e novembro.	18
Figura 4.4 – Diferença vetorial e BIAS médio da velocidade do vento em novembro de 2019.	18

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo geral.....	3
2.2 Objetivos específicos	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Espectro eletromagnético	4
3.2 O sensor ABI	5
3.3 Modelo de estimativa do vento	7
3.4 Radiossondagens	10
3.5 Sistema de análise	10
3.6 Reanálises do NCEP	11
3.7 Métricas estatísticas	11
3.7.1 Erro quadrático médio	11
3.7.2 Erro médio.....	12
3.7.3 Diferença vetorial média.....	13
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	15
5 CONCLUSÃO	20
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21

1 INTRODUÇÃO

O vento é o movimento de ar atmosférico que se desloca naturalmente, seguindo uma determinada direção. Sendo assim, pode ser caracterizado de acordo com sua direção e velocidade. Conhecer as informações sobre a direção e velocidade do vento em diferentes níveis da atmosfera são de grande importância para iniciar modelos numéricos de previsão de tempo, assim como para monitorar a evolução de sistemas de nuvens (LEESE et al., 1971; SERVICE, 2019).

Essas informações podem ser medidas de diversas maneiras utilizando instrumentos meteorológicos como o anemômetro e a biruta, boias oceânicas, aviões e navios, radiossondas entre diversos outros. No entanto, comparando-se com as imagens de satélites, as formas apresentadas exibem desvantagens com relação a resolução temporal e ou espacial (FUJITA et al., 1969; ALMEIDA, 2018).

A estimativa da direção e velocidade do vento por satélite é baseada na determinação do deslocamento das nuvens presentes nas imagens de satélite, considerando que as nuvens se deslocam exclusivamente devido à ação dos ventos. Dessa forma, é possível estimar os ventos em uma ampla área por conta da imagem do satélite geoestacionário que ocupa uma grande região do planeta (RADFORD, 1989; FLORENZANO, 2008).

A utilização de imagens de satélites meteorológicos geoestacionários para estimar a velocidade e direção do vento a partir do movimento das nuvens, iniciou-se no final da década de 60 e na primeira metade dos anos 70. No início, o acompanhamento do deslocamento das nuvens era realizado de forma manual e era utilizado imagens dos canais infravermelho. Após alguns anos, novas tecnologias foram criadas e as já existentes foram aprimoradas, possibilitando uma otimização nesse processo que era feito de forma manual,

tornando-se automático (LEESE et al., 1971; FUJITA et al., 1969; HUBERT; WHITNEY, 1971).

O modelo que foi desenvolvido no CPTEC/INPE para a extração dos ventos em diferentes níveis da troposfera é baseado no rastreamento das nuvens que estão presentes nas imagens dos canais visível, infravermelho próximo, vapor d'água e infravermelho janela do satélite GOES. As imagens do canal visível são utilizadas para fazer a extração do vento no período diurno, por conta da necessidade da presença da radiação solar, sendo ineficaz no período noturno, e as imagens do canal infravermelho são usadas para o período noturno (LAURENT et al., 2000).

As imagens sucessivas na faixa do infravermelho possibilitam uma boa estimativa de vento nos níveis altos e médios, mas não são interessantes para estimativa do vento nos níveis baixos. Sendo assim, para estimar o vento em baixos níveis no período noturno, o uso das imagens do infravermelho próximo é ideal. Nas imagens do canal visível, as nuvens baixas apresentam durante o período diurno, uma grande diferença nos níveis de cinza com relação aos oceanos. Dessa forma, as variáveis relativas ao vento nos níveis baixos podem ser estimadas com grande precisão (LAURENT et al., 2002).

Atualmente a Divisão de Satélites Ambientais (DSA) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) possuem um modelo de extração de vento operacional utilizando imagens do satélite GOES, apresentando valores aceitáveis para altos níveis, mas de menor qualidade para os vetores de vento em níveis baixos e médios (LEE et al., 1997).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O CPTEC/INPE possui, operacionalmente, um conjunto de algoritmos automáticos para a estimativa do vento utilizando dados provenientes de satélites geoestacionários. Tais algoritmos mantidos operacionalmente desde 2002 e sua principal aplicação é na assimilação de dados em modelos numéricos de previsão de tempo.

O objetivo geral deste trabalho é analisar estatisticamente os campos de vento referentes aos baixos níveis, gerados operacionalmente no CPTEC/INPE a partir de sequências de imagens dos canais visível e infravermelho próximo do satélite geoestacionário GOES-13. A análise foi realizada a partir da comparação entre os campos de vento e dados provenientes de re-análises do NCEP e radiossondagens.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

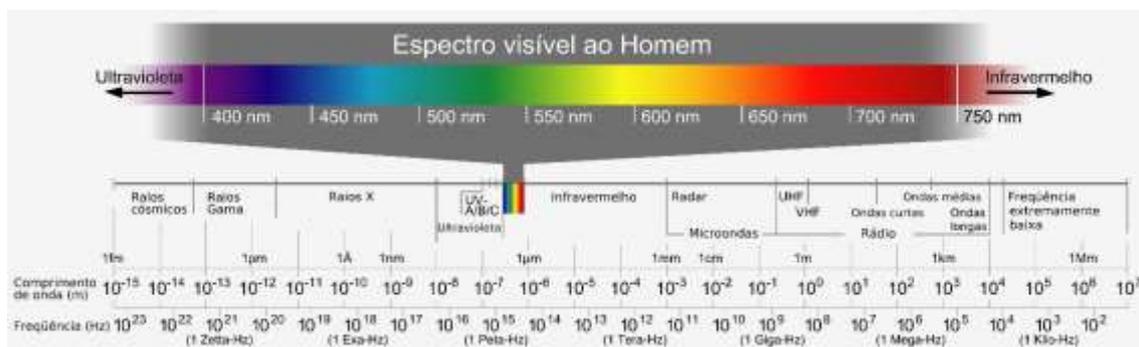
- Verificar a existência de erros sistemáticos na determinação da altura dos vetores e quantificá-los;
- Analisar o impacto deste tipo de dado no modelo global do CPTEC através da comparação entre rodadas de controle e rodadas utilizando tais dados no processo de assimilação de dados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Espectro eletromagnético

O espectro eletromagnético é a distribuição da intensidade da radiação eletromagnética com relação ao seu comprimento de onda ou frequência. Sendo assim, é caracterizado pelo intervalo de ondas de frequência extremamente baixa, passando por ondas de rádio, de TV, micro-ondas, radiação infravermelha, luz visível, radiação ultravioleta até chegar aos raios X e raios gama (UFRGS, 2019; OKUNO, 2013).

Figura 3.1 – O espectro eletromagnético.



Fonte: (ESPECTRO..., 2015).

A teoria da dualidade da onda-partícula, proposta e desenvolvida por Max Planck e por Albert Einstein a partir de 1901, e futuramente por Louis de Broglie, associa partícula com onda, na qual uma onda eletromagnética é emitida e propaga-se como se fossem pequenos pacotes de energia que são chamados de fótons. A energia E de cada fóton é calculada segundo a Equação (3.1) que relaciona o aspecto de partícula com o de onda (OKUNO, 2013).

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.1)$$

onde, h é a constante de Planck e vale $6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s} \approx 4,14 \times 10^{15} \text{ eV.s}$; c é a velocidade da luz, ν é a frequência da onda eletromagnética e λ é o comprimento de onda.

A radiação eletromagnética pode interagir com os corpos, como o humano, conduzindo energia. A forma de interação vai depender da energia da radiação, do meio absorvedor e emissor (OKUNO, 2013).

A Figura (3.2) representa os valores aproximados em comprimento de onda, frequência e energia para regiões selecionadas do espectro eletromagnético.

Figura 3.2 – Regiões do espectro eletromagnético.

Região	Comp. Onda (Å)	Comp. Onda (cm)	Frequência (Hz)	Energia (eV)
Rádio	$> 10^9$	> 10	$< 3 \times 10^9$	$< 10^{-5}$
Micro-ondas	$10^9 - 10^6$	$10 - 0.01$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{12}$	$10^{-5} - 0.01$
Infra-vermelho	$10^6 - 7000$	$0.01 - 7 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{12} - 4.3 \times 10^{14}$	$0.01 - 2$
Visível	$7000 - 4000$	$7 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	$2 - 3$
Ultravioleta	$4000 - 10$	$4 \times 10^{-5} - 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$	$3 - 10^3$
Raios-X	$10 - 0.1$	$10^{-7} - 10^{-9}$	$3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$	$10^3 - 10^3$
Raios Gama	< 0.1	$< 10^9$	$> 3 \times 10^{19}$	$> 10^5$

Fonte: Adaptada de UFRGS (2019).

3.2 O sensor ABI

O sensor Advanced Baseline Imager (ABI) é o principal componente da série GOES-R para imagens do clima, oceanos, meio ambiente e perigos (incêndios, vulcões, inundações, furacões e tempestades que geram tornados) da Terra. Ele possui a capacidade de visualização da Terra com 16 bandas espectrais diferentes, incluindo dois canais visíveis, quatro canais infravermelhos próximos e dez canais de infravermelhos. Esses diferentes comprimentos de onda são usados por modelos e ferramentas para indicar vários elementos na superfície da Terra ou na atmosfera, como árvores, água, nuvens, umidade ou fumaça (SATTELITES, 2019).

O ABI é um radiômetro de imagens passivas de multicanais projetado para observar o Hemisfério Ocidental e fornecer imagens de área variável e

informações radiométricas da superfície, atmosfera e da cobertura de nuvens da Terra. Além disso, o instrumento possui vários modos de varredura. O modo 4, ou modo de disco contínuo, a ABI produz uma imagem de disco inteiro (Hemisfério Ocidental) a cada cinco minutos. No modo 3, ou flex, o ABI produz simultaneamente um disco inteiro a cada 15 minutos, uma imagem CONUS (resolução de 3000 km por 5000km) a cada cinco minutos e dois domínios de mesoescala (resolução de 1000 km por 1000 km) a cada 60 segundos ou um subdomínio a cada 30 segundos. O modo 6, ou o modo flex de 10 minutos, que se tornou o modo de operação padrão para o GOES-16, fornece uma imagem de disco completa a cada 10 minutos, uma imagem CONUS a cada cinco minutos e imagens de ambos os domínios de mesoescala a cada 60 segundos (SATTELITES, 2019).

Em relação ao sistema anterior, o sensor ABI fornece três vezes mais informações espectrais, quatro vezes a resolução espacial e cobertura temporal cinco vezes mais rápido (SATTELITES, 2019). Sendo, atualmente, uma carga útil essencial que fornece mais de 65% de todos os produtos de dados. Na Figura (3.3) é possível observar uma comparação entre o sensor ABI e a corrente GOES anterior.

Figura 3.3 – Comparação GOES-R SERIES ABI vs Corrente GOES.

Atributo	ABI	Imager atual do GOES
Cobertura Espectral	16 bandas	5 bandas
Resolução espacial		
0,64 μm Visível	0,5 km	~1 km
Outros visíveis / perto de IR	1,0 km	n / D
Bandas (>2 μm)	2 km	~4 km
Cobertura Espacial		
Disco Cheio	4 por hora	Agendado (3 horas)
CONUS	12 por hora	~4 por hora
Mesoescala	30 ou 60 seg	n / D
Visível (bandas refletivas)		
Calibração em órbita	sim	não

Fonte: Adaptada de (SATTELITES, 2019).

3.3 Modelo de estimativa do vento

No CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos) do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), são estimados vento a partir de satélites, mais especificamente satélites geoestacionários. As nuvens se deslocam devido a ação significativa dos ventos, e com isso a direção e a velocidade são de grande importância para estimar esse deslocamento das nuvens que estão presentes nas imagens por satélite.

O CPTEC/INPE tem o intuito para a estimar o vento, e com isso, fornecer as informações sobre a circulação atmosférica que é movimentação das massas de ar em meso e grande escala. Essa movimentação ocorre na Troposfera, a camada da atmosfera mais próxima da Terra. Com uma grande cobertura espacial (80 a 100 km).

Sobre a superfície dos oceanos é praticamente impossível obter informação alguma sobre vento, no hemisfério sul a área oceânica é superior as áreas continentais, quando comparadas ao do hemisfério norte. Portanto os dados referentes ao vento, obtidos a partir de estações convencionais, são mais escassos.

Os nomes dos ventos mais utilizados são AMV (*Atmospheric Motion Vectors*), (*Cloud drift winds*), (*Cloud motion vectors*), (*Satellite winds*), (*Satwinds*), (*Cloud track winds*), (*Cloud motion winds*), (*Feature track winds*) e etc.

Neste presente trabalho serão chamados de AMV (*Atmospheric Motion Vectors*), são utilizados para descrever o escoamento na escala sinótica nos esquemas de assimilação de dados, o que torna necessário para obter o AMV com maior resolução espacial.

Existem várias etapas típicas no processo de estimativa de AMVs. No processamento das imagens por satélites, é feita uma retificação de imagens que é de extrema importância, principalmente para as imagens de canal visível devido a dependência do ângulo de iluminação que varia durante todo o dia, a utilização do canal visível mostrou um grande avanço na estimativa do vento

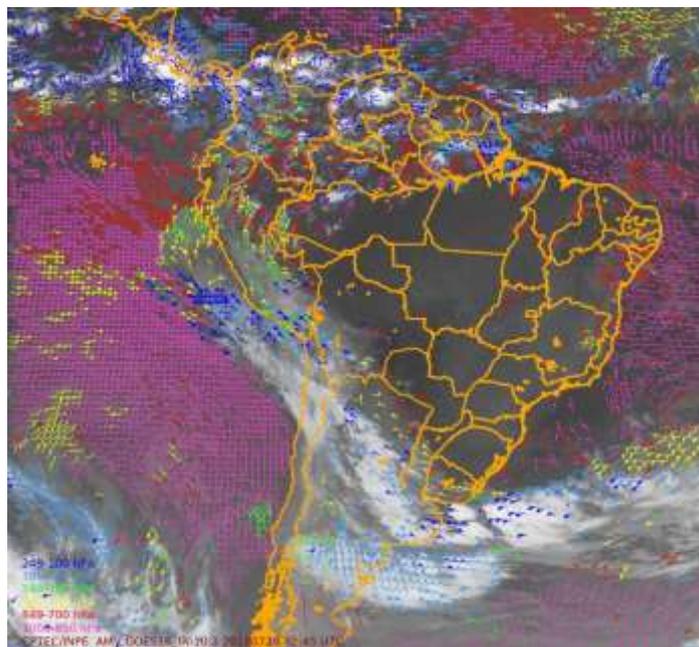
realizando a definição dos alvos mais úteis para o rastreamento com regiões que contenham nuvens ou um gradiente de vapor com contraste suficiente para o rastreamento. Essa técnica de rastreamento automático de nuvens foi realizada inicialmente utilizando o método das correlações cruzadas proposto por Leese et al. (LEESE et al., 1971).

Esta técnica descarta o rastreamento individual de nuvens devido à complexidade dessa tarefa mesmo se contando com um computador potente. Determinar uma posição específica dos alvos escolhidos na imagem seguinte, e cada alvo na imagem inicial, é feito um rastreamento nas imagens sucessivas para determinar o deslocamento. Um padrão de um intervalo de até 30 minutos as nuvens podem alterar a forma excessivamente ou até desaparecer, mas os alvos são suficientes geralmente permanecem para produção de AMVs, intervalos mais curtos, 15 minutos por exemplo, esse problema é menor e mais AMVs são produzidos, o campo era mais preciso, e se tinha uma melhora na estimativa.

É necessário que os resultados obtidos através do cálculo dos vetores, considerando o deslocamento geográfico da posição e direção, e o intervalo do tempo das imagens. Definição da altura do AMV estimada é extremamente necessária para a estimativa de vento e também a maior fonte de erro nesse dado. Logo após de todos os cálculos dos vetores de vento, o resultado alcançado passa por um controle de qualidade que são constituídos por alguns testes que analisam o nível de confiabilidade composto por cada vetor.

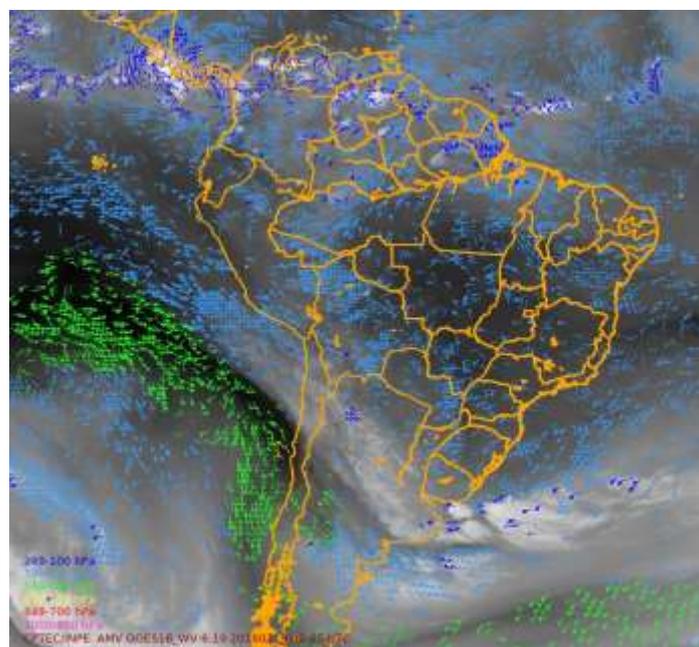
Abaixo são apresentados alguns exemplos dos campos de vento estimados a partir do uso dos canais infravermelho janela (Figura 3.4) e vapor d'água (Figura 3.5). Os canais visível e infravermelho próximo são utilizados apenas para a estimativa do vento nos baixos níveis, o canal do vapor d'água é empregado na estimativa do vento nos altos níveis e níveis médio e com o canal infravermelho janela é possível estimar o vento em todos os níveis da troposfera.

Figura 3.4 – Exemplo de um campo de vento obtido a partir do canal 10.3 μm (Infravermelho janela) do satélite GOES-16.



Fonte: Produção do autor.

Figura 3.5 – Exemplo de um campo de vento obtido a partir do canal 6.2 μm (vapor d'água) do satélite GOES-16.



Fonte: Produção do autor.

3.4 Radiossondagens

A radiossonda é um aparelho transmissor de rádio, de sensores de pressão, de temperatura e de umidade, que é lançado na atmosfera, transportado por um balão de borracha, inflado com gás. A radiossonda tem o alcance com cerca de 30 km de altitude, quando ocorre o rompimento das paredes do balão e o sistema cai em direção a superfície. Dessa forma tornando-se muitas vezes descartáveis, sendo utilizadas apenas uma única vez.

A mudança de pressão em altitude é feita conforme vão sendo identificadas as camadas a temperatura virtual, variando linearmente com a altura e composto a equação hipsométrica para cada uma delas, e assim vinculado a um microcomputador onde serão feitos uma serie de cálculos.

Os dados aerológicos alcançados através de radiossondagens são usados para identificar as características dinâmicas e termodinâmicas da atmosfera. Com avanço tecnológico na área de informática tornou-se rotineiro proceder a análise de perfis aerológicos usando microcomputadores dotados do software apropriado.

A radiossonda refere-se em um tipo de sondagem das camadas superiores da atmosfera, constituído no interior de uma pequena caixa plástica lançada na superfície para atmosfera, por meio de um balão, formado por de sensores de temperatura, umidade de pressão, simultaneamente com um radiotransmissor e uma antena. As radiossondagens ainda são muito usadas embora existam outras técnicas como, balões cativos, balões livres, aviões e satélites.

3.5 Sistema de análise

O sistema de análise desenvolvido se baseia na construção de gráficos para análise espacial dos campos de vento. A última versão está mais simples e eficiente em relação a anterior. Foi aperfeiçoado o processo de identificação de possíveis problemas nos dados de vento, como discrepâncias consideráveis entre a direção e velocidade do vento, o que, geralmente, está associado à erros na determinação da altura em locais com cisalhamento vertical do vento.

Em relação à conveniência no uso da ferramenta, algumas etapas que anteriormente necessitavam serem executadas manualmente foram simplificadas através da automatização utilizando shell scripts.

3.6 Reanálises do NCEP

O NCEP (National Centers for Environmental Prediction) em parceria com o NCAR (National Center for Atmospheric Research) disponibilizam séries históricas de reanálise desde 1948 até a atualidade com 2,5 x 2,5 de resolução espacial, o NCEP/NCAR Reanalysis Project. Esse esforço envolve a recuperação de dados de superfície terrestre, navio, radiossonda, aviões, satélites e outros dados, controle e assimilação. Para a geração dessas reanálises, são usados campos globais atmosféricos e de fluxos superficiais derivados dos sistemas de previsão numérica e de assimilação de dados do NCEP/NCAR. Neste trabalho, utilizamos os perfis de vento (componentes u e v) em todas as camadas disponíveis. (KISTLER et al., 2001).

Utilizando esses perfis, é possível verificar, principalmente, erros na determinação da altura dos AMVs, o que é crítico para a utilização efetiva do vento nas diversas aplicações usuais.

Num trabalho futuro, um dado de referência com maior resolução espacial, vertical e ou horizontal, pode ser utilizado.

3.7 Métricas estatísticas

Nesta seção serão apresentadas as métricas estatísticas que foram utilizadas para realizar a análise estatística dos dados de campos de vento.

3.7.1 Erro quadrático médio

O erro quadrático médio (EQM) é uma medida de precisão comumente utilizada no campo de previsões/observações. O EQM procede na previsão em grade e campos observados espacialmente através do cálculo da média da

diferença quadrada entre os dados que foram gerados pelos modelos de previsão e os dados que foram observados em cada um dos M números de previsões nos pontos de grade (WILKS, 2011). De acordo com a Fórmula (3.2).

$$EQM = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (y_m - o_m)^2 \quad (3.2)$$

em que:

- y_m = Valor previsto para observação m .
- o_m = Valor observado para observação m .
- M = Tamanho amostral.

O ideal para o erro quadrático médio ter uma previsão perfeita, ou seja, isento de erros é ser muito próximo de zero, com o valor maior para o MSE vai indicar uma precisão decrescente da previsão, aumentando a diferença entre os valores da previsão e observação. Neste trabalho será utilizado a raiz do erro quadrático médio (REQM) que é a raiz quadrada do MSE e serve para expressar a acurácia dos resultados numéricos. A vantagem de utilizar essa expressão é que o REQM apresenta valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada (WILKS, 2011).

3.7.2 Erro médio

O erro médio (EM) é também conhecido como BIAS ou Viés e calcula, simplesmente, a média da diferença dos dados que foram gerados pelos modelos de previsão e os dados que foram observados e, portanto, expressa o viés das previsões (WILKS, 2011). De acordo com a Fórmula (3.3):

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - o_k)^2 \quad (3.2)$$

em que:

- y_k = Valor previsto para observação k.
- o_k = Valor observado para observação k .
- n = Tamanho amostral.

O cálculo do viés ajuda a avaliar a ocorrência de superestimava (valores positivos de EM) ou subestimativa (valores negativos de EM) dos valores observados. A retirada do viés é um método de correção estatística que ao ser aplicado nas previsões pode aumentar sua acurácia reduzindo erros (WILKS, 2011).

3.7.3 Diferença vetorial média

A diferença vetorial média (DVM) é também conhecida como mean vector difference (MVD) e expressa a diferença entre as velocidades do vento da radiossondagem a do vento AMV (MITRA, 2008). De acordo com a Fórmula (3.4):

$$MVD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N VD_i \quad (3.4)$$

Além disso, a diferença vetorial (DV) ou vector difference (VD) vai mostrar uma estimativa do erro sistemático relacionado ao cálculo dos vetores (MITRA, 2008). De acordo com a Fórmula (3.5):

$$VD_i = \sqrt{(U_i - U_r)^2 + (V_i - V_r)^2} \quad (3.5)$$

em que:

- i = observação.
- r = modelo.
- U = componente zonal.
- V = componente meridional.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Essa seção descreve a apresentação e discussão dos resultados preliminares da análise dos campos de vento realizada através da comparação com medidas de radiossondas.

Inicialmente foi confeccionado uma base de dados amostrais dos campos de vento estimados a partir de imagens dos canais WV e IR do satélite GOES-16. Em seguida, foi avaliado o erro quadrático médio (RMS) e o viés desses dados em relação às reanálises do NCEP além da distribuição espacial das medidas, o que é importante para análise dos sistemas meteorológicos e para assimilação em modelos numéricos de previsão de tempo.

Os campos de vento obtidos a partir das imagens do GOES-16 apresentam maior densidade de vetores, principalmente após a alteração na frequência de amostragem de 15 para 10 minutos (fev/2019). Coincidentemente com a alteração na taxa de amostragem foi observado uma diminuição do erro (RMSE) após fevereiro de 2019, sendo mais acentuada durante os meses de inverno.

Contudo, apesar da maior densidade de vetores e a facilidade com que o método automático de rastreamento identificou os padrões de nuvens nas imagens sucessivas (método de rastreamento baseado na máxima correlação cruzada), os erros se mantiveram próximo da média de 2018.

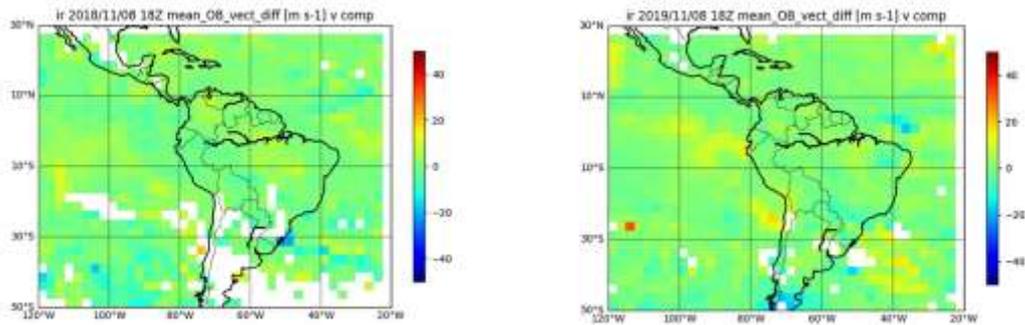
A maior densidade de vetores também pode ser explorada de forma a restringir os limiares do controle de qualidade atual, eliminando uma quantidade superior de vetores, porém mantendo a densidade de observações em um valor aceitável.

A comparação entre os campos de vento e as saídas do modelo global de previsão de tempo do CPTEC ainda se encontra em desenvolvimento.

Analisando a diferença vetorial média para os meses de novembro de 2018 e 2019 (Figura 4.1), para o campo referente ao canal do infravermelho janela (IR 10.2 μm), é possível notar maior quantidade de informações geradas no mapa e uma leve diminuição nos máximos do erro para o ano de 2019. O aumento na

cobertura espacial dos vetores pode ser explicado pela da mudança da resolução temporal do GOES-16, que foi elevada de 15 minutos para 10 minutos.

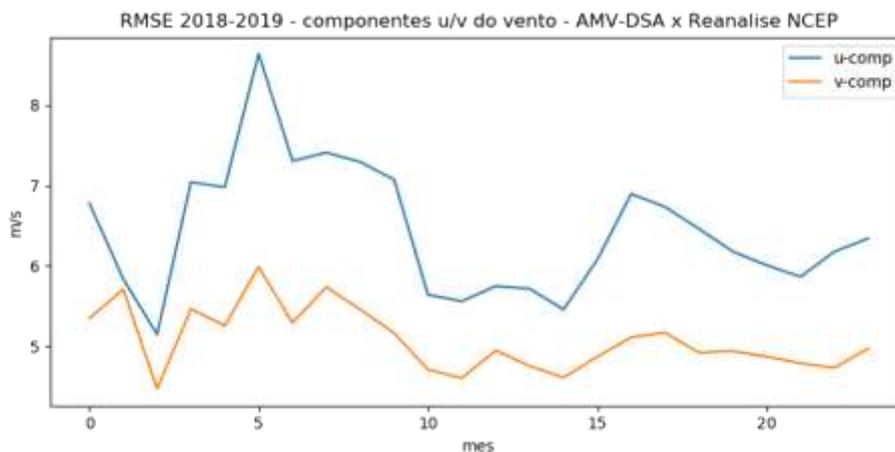
Figura 4.1 – Diferença vetorial média do vento em 2018 e em 2019.



Fonte: Produção do autor.

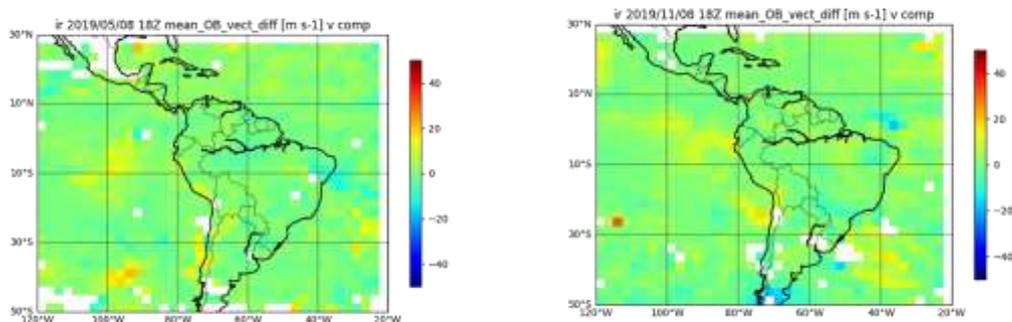
Analisando a Figura 4.2, no mês de maio o RMSE foi maior para a componente u e v do vento e no mês de novembro apresentou os menores valores. Com isso, na Figura 4.3, é possível observar que a distribuição da diferença vetorial foi maior no mês de novembro e menor no mês de maio.

Figura 4.2 – RMSE para os anos de 2018 e 2019.



Fonte: Produção do autor.

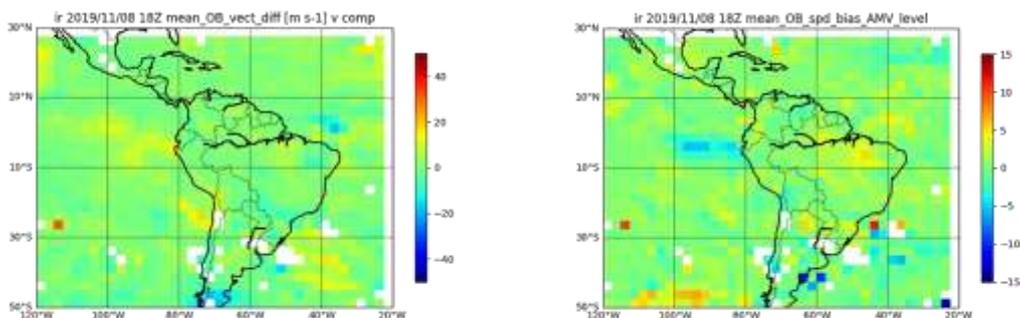
Figura 4.3 – Diferença vetorial no mês de maio e novembro.



Fonte: Produção do autor.

Além disso, comparando a diferença vetorial e o BIAS médio da velocidade do vento representados na Figura 4.4, é possível verificar que a distribuição espacial do erro para o BIAS era maior em relação aos mesmos quadrantes da diferença vetorial apresentada na Figura 4.3.

Figura 4.4 – Diferença vetorial e BIAS médio da velocidade do vento em novembro de 2019.

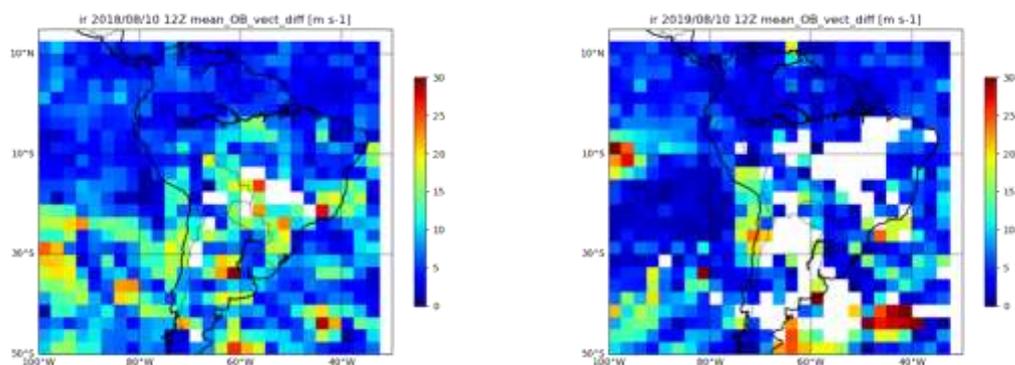


Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.5 apresenta um exemplo da distribuição da diferença vetorial para o dia 10 de maio de 2018 e 2019. É observado que os erros para o ano de 2019 estão mais concentrados em pontos do que em relação ao ano de 2018. É

necessário investigar se esse comportamento é devido à alteração na resolução temporal das imagens.

Figura 4.5 – Distribuição da diferença vetorial para o dia 10 de maio de 2018 e 2019.



Fonte: Produção do autor.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho realizou com sucesso o desenvolvimento da revisão bibliográfica, confecção de uma base de dados e análise estatística dos campos de vento para o ano de 2019, gerados operacionalmente no CPTEC/INPE, a partir de sequências de imagens do sensor *Advanced Baseline Imager (ABI)* a bordo do satélite geoestacionário GOES-16. Sendo possível realizar a comparação entre os campos de vento e dados de radiossondas e reanálises. O processo de análise estatística envolveu o uso de ferramentas desenvolvidas nas linguagens *Fortran*, *Korn Shell Script* e *Python* além de trabalhar com a ferramenta de manipulação de dados de geociências *GrADS (Grid Analysis and Display System)*.

Portanto, o presente projeto contribuiu com os resultados da análise referente ao período de janeiro a dezembro de 2019 possibilitando auxiliar o CPTEC/INPE em entender melhor qual é o impacto do uso desses campos de vento no processo de assimilação bem como investigar os possíveis erros presentes nos dados de vento estimados por esses algoritmos.

Os resultados indicam que é possível aprimorar o método de controle de qualidade dos campos de vento para eliminar vetores que têm sua altura definida erroneamente pelo método de definição da altura. Futuramente, o desenvolvimento de um teste que avalie todos os vetores estimados a partir de todos os canais simultaneamente se mostra promissor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, P. G. d. **Contribuições da metodologia aprendizagem baseada em projetos para ensino de meteorologia no ensino fundamental**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo.

FLORENZANO, T. G. Os satélites e suas aplicações. SindCT, 2008.
FUJITA, T. T.; WATANABE, K.; IZAWA, T. Formation and structure of equatorial anticyclones caused by large-scale cross-equatorial flows determined by ats-i photographs. **Journal of Applied Meteorology**, v. 8, n. 4, p. 649–667, 1969.

HUBERT, L. F.; WHITNEY, L. F. Wind estimation from geostationary satellite pictures. **MWR**, v. 99, p. 665–672, 1971.

KISTLER, R.; KALNAY, E.; COLLINS, W.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; KANAMITSU, M.; KOUSKY, V. et al. The ncep–ncar 50-year reanalysis: monthly means cd-rom and documentation. **Bulletin of the American Meteorological society**, American Meteorological Society, v. 82, n. 2, p. 247–268, 2001.

LAURENT, H.; ARAI, N.; FOMIN, B.; MACHADO, L. A. T.; GONDIM, M. A.; IRD, L. A. extração do vento utilizando imagens de satélite no cptec: Nova versão e avaliação com dados do wetamc/lba e dados operacionais da dsa/cptec. In: **International Winds Workshop**. [S.l.: s.n.], 2002. v. 6.

LAURENT, H.; MACHADO, L. A. T.; FOMIN, B.; GONDIM, M. A.; IRD, L.; GGRENOBLE, F. Extração do vento utilizando imagens de satélite no cptec: Nova versão e avaliação com dados do wet amc/lba. In: **XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro**. [S.l.: s.n.], 2000. p. 16–20.

LEE, T. F.; TURK, F. J.; RICHARDSON, K. Stratus and fog products using goes-8–9 3.9- μ m data. **Weather and Forecasting**, v. 12, n. 3, p. 664–677, 1997.

LEESE, J. A.; NOVAK, C. S.; CLARK, B. B. An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation. **Journal of applied meteorology**, v. 10, n. 1, p. 118–132, 1971.

MITRA, A. K. et al. An operational status and validation of cloud motion vectors with improvement in water vapor winds derived from KALPANA-1 satellite at IMD. In: **Proceedings of Ninth International Wind Workshop, Annapolis, Maryland, USA**. 2008. p. 14-18.

OKUNO, E. Efeitos biológicos das radiações ionizantes: acidente radiológico de goiânia. **estudos avançados**, SciELO Brasil, v. 27, n. 77, p. 185–200, 2013.

WILKS, Daniel S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. Academic press, 2011.