



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,  
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/04.01.20.32-TDI

## **AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR ESTIMADA PELO SENSOR ABI/GOES-16, NO OCEANO ATLÂNTICO TROPICAL E SUDOESTE**

Mayna Helena Azevedo

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Meteorologia, orientada pelos Drs.  
José Antonio Aravéquia, e Natália  
Rudorff Oliveira, aprovada em 20  
de março de 2020.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/428TQ8P>>

INPE  
São José dos Campos  
2020

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):****Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

**Membros:**

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,  
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/04.01.20.32-TDI

## **AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR ESTIMADA PELO SENSOR ABI/GOES-16, NO OCEANO ATLÂNTICO TROPICAL E SUDOESTE**

Mayna Helena Azevedo

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Meteorologia, orientada pelos Drs.  
José Antonio Aravéquia, e Natália  
Rudorff Oliveira, aprovada em 20  
de março de 2020.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/428TQ8P>>

INPE  
São José dos Campos  
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Azevedo, Mayna Helena.

Az25a Avaliação da temperatura da superfície do mar estimada pelo sensor ABI/GOES-16, no oceano Atlântico Tropical e Sudoeste / Mayna Helena Azevedo. – São José dos Campos : INPE, 2020.

xxiv + 119 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/04.01.20.32-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020.

Orientadores : Dr. José Antonio Aravéquia e Dra. Natália Rudorff Oliveira.

1. TSM. 2. Temperatura da Superfície do Mar. 3. GOES-16. 4. OSTIA. 5. NOAA Geo-Polar-Blended. I.Título.

CDU 551.463.6

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



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

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

A FOLHA DE APROVAÇÃO SERÁ INCLUIDA APÓS RESTABELECIMENTO DAS ATIVIDADES PRESENCIAIS.

Por conta da Pandemia do COVID-19, as defesas de Teses e Dissertações são realizadas por vídeo conferência, o que vem acarretando um atraso no recebimento nas folhas de aprovação.

Este trabalho foi aprovado pela Banca e possui as declarações dos orientadores (confirmando as inclusões sugeridas pela Banca) e da Biblioteca (confirmando as correções de normalização).

Assim que a Biblioteca receber a Folha de aprovação assinada, esta folha será substituída.

Qualquer dúvida, entrar em contato pelo email: [pubtc@inpe.br](mailto:pubtc@inpe.br).

Divisão de Biblioteca (DIBIB).



*"Para uma mente bem estruturada, a morte é apenas uma aventura seguinte".*

J.K. ROWLING  
em *"Harry Potter e a Pedra Filosofal"*, 1997





## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, por suportarem com bom humor todas as reclamações e crises, além de orgulhar-se de todo meu esforço, por mais que compreendam pouco de meu estudo.

Agradeço de todo meu coração aos meus orientadores Dr. José Antônio Aravéquia e Dr(a). Natália Rudorff Oliveira, pela paciência, disponibilidade e todo conhecimento que obtive sobre suas tutelas.

E finalmente agradeço ainda a CAPES e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, pela oportunidade e todos esforços de apoiar os alunos e a Pós-Graduação



## RESUMO

No final de 2016 foi lançado o primeiro satélite da nova geração de satélites geoestacionários da NOAA (GOES-16), com um sensor Advanced Baseline Imager (ABI) capaz de estimar a temperatura da superfície do mar (TSM) a cada 15 min ao longo de todo ciclo diurno. Há uma expectativa de que este novo produto possa gerar novas informações sobre o ciclo diurno da TSM, processos de mesoescala e interações oceano-atmosfera, bem como ter um uso potencial na assimilação de dados em modelos oceânico acoplados à modelos numéricos de previsão do tempo. No entanto, antes de seu uso operacional é preciso averiguar a qualidade deste produto comparado a dados in situ e outros produtos padrões de TSM. Desta forma o presente trabalho apresenta uma avaliação da TSM ABI/GOES-16 no Atlântico Tropical e Sudoeste, ao largo da costa Brasileira até 20°O. Observações in situ de programas brasileiros em conjunto com outros países (PIRATA e PNBoia) são usadas para comparar a TSM gerada pelo ABI-GOES-16 (TSM<sub>sub-pele</sub>) com dados de TSM in situ (TSM<sub>balde</sub>). Numa segunda etapa a TSM ABI (L3) é comparada com dois produtos globais L4 (TSM<sub>fnd</sub>) OSTIA e Geo Polar Blended. Por fim, são feitas algumas análises comparativas da representatividade dos processos de mesoescala pelo produto ABI (L3) e global (L4), em um estudo de caso. Como resultado, comparações entre o algoritmo e a TSM in situ expõem viés positivo para as médias horárias do período diurno (PNBoia fixa e deriva) revelando a maior discrepância entre a TSM sub-pele (de satélite) e TSM in situ com a estratificação termal diurna. Viés médio ficou abaixo de 0,1 °C e o EMQ e erro absoluto igual ou menor que 0,5 °C, para quase todos os casos, que é o recomendado pelo GHRSSST. Na comparação entre a TSM ABI-GOES-16 L3 com produtos L4 verificou-se que o produto de estudo TSM ABI-GOES-16 pode fornecer benefícios significativo no fornecimento de TSM para o Brasil, com maiores erros encontrados nas regiões de maior gradiente horizontal e mais dinâmicas i.e., região costeira, Confluência Brasil-Malvinas e extremo sul do Atlântico Sul. Melhorias precisam ser feitas em regiões mais complexas, mas para processos de larga escala a TSM ABI L3 OSTIA possui bom desempenho.

Palavras-chave: TSM. Temperatura da Superfície do Mar. GOES-16. OSTIA. NOAA Geo-Polar-Blended. Oceano Atlântico. PNBoia. PIRATA.



# EVALUATION OF THE SEA SURFACE TEMPERATURE ESTIMATED BY THE ABI/GOES-16 SENSOR, IN THE TROPICAL ATLANTIC OCEAN AND SOUTHWEST

## ABSTRACT

At the end of 2016, the first satellite of the new generation of NOAA geostationary satellites (GOES-16) was launched, with an Advanced Baseline Imager (ABI) sensor capable of estimating the sea surface temperature (SST) every 15 minutes throughout the daytime cycle. There is an expectation that this new product can generate new information about the SST diurnal cycle, mesoscale processes and ocean-atmosphere interactions, as well as having a potential use in the assimilation of data in oceanic models coupled with numerical weather forecasting models. However, before its operational use, it is necessary to check the quality of this product compared to in situ data and other standard SST products. In this way, this work presents an evaluation of SST ABI/GOES-16 in the Tropical and Southwest Atlantic, off the Brazilian coast up to 20°W. In situ observations of Brazilian programs in conjunction with other countries (PIRATA and PNBoia) are used to compare the SST generated by ABI-GOES-16 ( $SST_{\text{subskin}}$ ) with SST in situ data ( $SST_{\text{bucket}}$ ). In a second step, SST ABI (L3) is compared with two global L4 products ( $SST_{\text{find}}$ ) OSTIA and Geo Polar Blended. Finally, some comparative analyzes of the representativeness of the mesoscale processes by the ABI (L3) and global (L4) products are made, in a case study. As a result, comparisons between the algorithm and the in situ SST expose a positive bias for the hourly averages of the daytime period (fixed and drifting bouys PNBoia) revealing the largest discrepancy between the sub-skin (satellite) SST and the in situ SST with daytime thermal stratification. Mean bias was below 0.1 °C and the RMSE and absolute error equal to or less than 0.5 °C, for almost all cases, which is recommended by the GHRSSST. When comparing the SST ABI-GOES-16 L3 with L4 products, it was found that the study product SST ABI-GOES-16 can provide significant benefits in the supply of SST, with greater errors found in regions with a higher horizontal gradient and dynamic, i.e, coastal region, Brazil-Malvinas Confluence Zone and Southern Atlantic. Improvements need to be made in more complex regions, but for large-scale processes the SST ABI L3 OSTIA performs well.

Keywords: GOES-16. SST. Sea Surface Temperature. OSTIA. NOAA Geo-Polar-Blended. Atlantic Ocean. PNBoia. PIRATA.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Tensão média do vento e tensão zonal do vento ( $N/m^2$ ): a) média anual, b) Fevereiro e c) Agosto. Dados de reanálise do NCEP 1968-1996 de Kalnay et al. (1996). . . . .	8
2.2 Variação da temperatura da superfície com a latitude, utilizando dados climatológicos de Kalnay et al. (1996). . . . .	9
2.3 Perfil Vertical de TSM. Diagrama esquemático mostrando um perfil vertical da camada da superfície do oceano durante a) noite ou durante o dia com vento moderado para forte ( $> 6$ m/s) e b) dia com aquecimento solar, com ventos de intensidade leve ( $< 6$ m/s). . . . .	11
3.1 Fluxograma Resumindo a Metodologia. Da esquerda para direita encontra-se três principais estágios: Dados in situ; TSM ABI-GOES-16; e Produtos L4. As etapas desses tópicos são a coleta de dados, tratamento preliminar, comparação de dados e análise de incerteza e das diferenças espaço-temporal, finalizando com um estudo de caso. . . . .	21
3.2 Área de estudo, região da costa do Brasil e oceano adjacente a costa brasileira, de $65-20^{\circ}O$ , e $10^{\circ}N$ a $45^{\circ}S$ . . . . .	23
3.3 Média mensal da TSM (em $^{\circ}C$ ) na área de estudo: a) média para o mês de março; b) média para o mês de agosto; e c) média mensal para todo ano de 2018 obtidos com dados do sensor MODIS-Aqua. . . . .	24
3.4 Média mensal da intensidade do vento, utilizando dados de sensores de micro-ondas (SSM/I, Windsat e AMSR2) produzidos pelo grupo <i>Remote Sensing System</i> : a) média mensal de março de 2018 e b) média mensal de agosto de 2018. . . . .	25
3.5 Boias utilizadas do PIRATA na pesquisa, sinalizadas em roxo, com suas devidas coordenadas. . . . .	27
3.6 Boias utilizadas do PNBoia na pesquisa. Sinalizado em vermelho estão as boias fixas na costa brasileira. Marcado em roxo são as boias de deriva. . . . .	29
3.7 a) Canais ABI do infravermelho termal com função resposta do sensor, e a transmitância atmosférica para uma atmosfera padrão (exemplificada); b) Campo de visada do sensor ABI indicando a degradação da resolução espacial com aumento do ângulo de visada e os modos de imageamento; c) Imagem de TSM ABI L2 na projeção de satélite (composição horária com 2 km, NOAA). . . . .	30

4.1	Médias para o ano de 2018 (dado pontual) do PNBoia de deriva, com nível de qualidade 3-5 (juntos), no período noturno e diurno, sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) desvio padrão semanal, b) frequência semanal, c) viés semanal e d) média mensal da temperatura.	52
4.2	Médias para o ano de 2018 (janela de 5x5 pixel) do PNBoia de deriva, com nível de qualidade 3-5 (juntos), no período noturno e diurno, sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) desvio padrão semanal, b) frequência semanal, c) viés semanal e d) média mensal da temperatura. . . . .	53
4.3	a) Fração cobertura de nuvens MODIS-Terra, e b) Vapor d'água precipitável integrado na atmosfera MODIS-Terra, de Janeiro a Dezembro 2018 na região amostrada pelos derivadores (20-45°S; 20-65°O). Séries geradas pelo aplicativo giovanni.nasa. . . . .	54
4.4	Dispersão para o ano de 2018 do PNBoia de deriva, com nível de qualidade 3-5 (juntos), sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) dados pontuais e b) janela de 5x5 pixel. . . . .	57
4.5	Dispersão para as estações de 2018 do PNBoia de deriva, com nível de qualidade 3-5 (juntos), sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) dados pontuais e b) janela de 5x5 pixel. . . . .	58
4.6	Médias para o ano de 2018 (dado pontual) do PNBoia fixa, com nível de qualidade 3-5 (juntos), no período noturno e diurno, sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) desvio padrão semanal, b) frequência semanal, c) viés semanal e d) média mensal da temperatura. .	63
4.7	Médias para o ano de 2018 (janela de 5x5 pixel) do PNBoia fixa, com nível de qualidade 3-5 (juntos), no período noturno e diurno, sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) desvio padrão semanal, b) frequência semanal, c) viés semanal e d) média mensal da temperatura. .	64
4.8	Dispersão para o ano de 2018 do PNBoia fixa, com nível de qualidade 3-5 (juntos), sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) dados pontuais e b) janela de 5x5 pixel. . . . .	67
4.9	Dispersão por estações de 2018 do PNBoia fixa, com nível de qualidade 3-5 (juntos), sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) dado pontual e b) janela de 5x5 pixel. . . . .	68
4.10	Médias para o ano de 2018 (dado pontual) do PIRATA com nível de qualidade 3-5 (juntos) nas profundidades de 1 e 10 m, sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) desvio padrão semanal, b) frequência semanal, c) viés semanal e d) média mensal da temperatura .	74



4.11	Médias para o ano de 2018 (janela de 5x5 pixel) do PIRATA com nível de qualidade 3-5 (juntos) nas profundidades de 1 e 10 m, sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) desvio padrão semanal, b) frequência semanal, c) viés semanal e d) média mensal da temperatura . . . . .	75
4.12	a) Fração cobertura de nuvens MODIS-Terra, e b) Vapor d'água precipitável integrado na atmosfera MODIS-Terra, de Janeiro a Dezembro 2018 na região amostrada pelas boias PIRATA (10°N-20°S; 20-40°O). Séries geradas pelo aplicativo giovanni.nasa. . . . .	76
4.13	Dispersão (profundidade de 1 m) para o ano de 2018 do PIRATA com nível de qualidade 3-5 (juntos), sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) dados pontuais e b) janela de 5x5 pixel. . . . .	78
4.14	Dispersão (profundidade de 1 m) por estações de 2018 do PIRATA com nível de qualidade 3-5 (juntos), sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) dado pontual e b) janela de 5x5 pixel. . . . .	79
4.15	Dispersão (profundidade de 10 m) para o ano de 2018 do PIRATA com nível de qualidade 3-5 (juntos), sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) dado pontual e b) janela de 5x5 pixel. . . . .	80
4.16	Dispersão (profundidade de 10 m) por estações de 2018 do PIRATA com nível de qualidade 3-5 (juntos), sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) dado pontual e b) janela de 5x5 pixel. . . . .	81
4.17	Médias para o ano de 2018 (dado pontual) do PIRATA com nível de qualidade 3-5 (juntos) nas profundidades de 1 e 10 m, ventos com intensidade maior ou igual a 6 m/s em: a) desvio padrão semanal, b) frequência semanal, c) viés semanal e d) média mensal da temperatura . . . . .	85
4.18	Dispersão (profundidade de 1 e 10 m) para o ano de 2018 do PIRATA com nível de qualidade 3-5 (juntos), ventos com intensidade maior ou igual a 6 m/s em: a) todo ano, dado pontual com profundidade de 1 m e b) todo ano, dado pontual com profundidade de 10 m. . . . .	86
4.19	Dispersão (profundidade de 1 e 10 m) por estação de 2018 do PIRATA com nível de qualidade 3-5 (juntos), ventos com intensidade maior ou igual a 6 m/s em: a) por estação, dado pontual com profundidade de 1 m e b) por estação, dado pontual com profundidade de 10 m. . . . .	87
4.20	Imagem RGB cor verdadeira do sensor VIIRS (SNPP) do dia 22 de janeiro 2018, mostrando a poeira desértica e a fumaça das queimadas do continente Africano que atravessa o Atlântico Tropical. O focos quentes de incêndio identificados com o mesmo sensor, estão destacados em vermelho. Imagem extraída do aplicativo worldview.nasa. . . . .	88
4.21	ABI-GOES-16 - OSTIA - Meses de 2018, Nível de Qualidade 3-5 . . . . .	91

4.22	ABI-GOES-16 - OSTIA - Meses de 2018, ventos diurnos com intensidade maior ou igual a 6 m/s . . . . .	92
4.23	ABI-GOES-16 - OSTIA - por estação do ano de 2018, Nível de Qualidade 3-5 . . . . .	93
4.24	ABI-GOES-16 - OSTIA - por estação do ano de 2018, ventos com intensidade maior ou igual a 6 m/s . . . . .	94
4.25	Recorte da área de estudo, para a região do Rio de Janeiro, com destaque em vermelho simbolizando a posição das duas boias de Cabo Frio e uma de Niterói. As duas boias de Cabo Frio encontra-se próximas uma da outra, portanto, seus pontos se sobrepõem. . . . .	96
4.26	Recorte da área de estudo, sinalizado quadrante em vermelho de 45–30°S e 60–30°O, utilizando as boias do PNBoia de deriva . . . . .	98
4.27	Recorte da área de estudo, sinalizado em vermelho as boias do PIRATA dentro da delimitação de 10°N até 10°S . . . . .	99
4.28	Imagem da ressurgência no Rio de Janeiro, para o dia 14/11/2018, para a) produto global MUR JPL L4, b) produto global OSTIA L4, c) produto ABI-GOES-16 NOAA L3 as 10 GMT e d) produto ABI-GOES-16 OSISAF L3 as 10 GMT. . . . .	102
4.29	Imagem do satélite GOES-16 da América Latina no canal do visível (canal 2, 0,64 microns), horário 10 GMT do dia 14/11/2018. . . . .	103
4.30	Imagem do satélite GOES-16 da América Latina no canal do infravermelho (canal 14, 11,2 microns), horário 10 GMT do dia 14/11/2018. . . . .	104

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1	Resumo dos programas PIRATA e PNBoia . . . . . 29
3.2	Resumo dos produtos L3 e L4 . . . . . 39
3.3	Resumo da divisão dos conjuntos de dados do PIRATA e PNBoia. . . . . 41
3.4	Produtos utilizados no estudo de caso da ressurgência de Cabo Frio e suas especificações . . . . . 46
4.1	Estatística da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PNBoia de deriva para dado pontual e janela de 5x5 pixel, de nível de qualidade (NQ) 3-5 (juntos) com relação ao dia, noite e dia/noite: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ). . . . . 49
4.2	Estatística diurna e noturna da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PNBoia de deriva para dado pontual, por nível de qualidade (NQ) 3-5 (separado). Dados apresentado por: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ). . . . . 50
4.3	Estatística diurna e noturna da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PNBoia de deriva para janela de 5x5 pixel, por nível de qualidade (NQ) 3-5 (separado). Dados apresentado por: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ) . . . 50
4.4	Estatística de dispersão da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PNBoia de deriva para dado pontual e janela de 5x5 pixel, por nível de qualidade (NQ) 3-5 (juntos), para todo ano de 2018 e por estação do ano. Dados apresentado por: Coeficiente Angular e $R^2$ . . . . 55
4.5	Estatística da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PNBoia fixa para dado pontual e janela de 5x5 pixel, de nível de qualidade 3-5 (juntos) com relação ao dia, noite e dia/noite: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ). . . . . 60
4.6	Estatística diurna e noturna da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PNBoia fixa para dado pontual, por nível de qualidade (NQ) 3-5 (separado). Dados apresentado por: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ). . . . . 61

4.7	Estatística diurna e noturna da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PNBoia fixa com janela de 5x5 pixel, por nível de qualidade (NQ) 3-5 (separado). Dados apresentado por: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ). . . . .	61
4.8	Estatística de dispersão da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PNBoia fixa para dado pontual e janela de 5x5 pixel, por nível de qualidade (NQ) 3-5 (juntos), para todo ano de 2018 e por estação do ano. Dados apresentado por: Coeficiente Angular e $R^2$ . . . . .	65
4.9	Estatística da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PIRATA para dado pontual e janela de 5x5 pixel, de nível de qualidade 3-5 (juntos), sem controle de qualidade por intensidade do vento, nas profundidades de 1 e 10 m: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ). . . . .	70
4.10	Estatística da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PIRATA para dado pontual, de nível de qualidade (NQ) 3-5 (separado), sem controle de qualidade por intensidade do vento, nas profundidades de 1 e 10 m: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ). . . . .	71
4.11	Estatística da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PIRATA para janela de 5x5 pixel, de nível de qualidade (NQ) 3-5 (separado), sem controle de qualidade por intensidade do vento, nas profundidades de 1 e 10 m: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ). . . . .	71
4.12	Estatística de dispersão da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PIRATA de profundidade de 1 m, sem controle de qualidade por intensidade do vento, para dado pontual e janela de 5x5 pixel, por nível de qualidade (NQ) 3-5 (juntos), para todo ano de 2018 e por estação do ano. Dados apresentado por: Coeficiente Angular e $R^2$ . . . . .	77
4.13	Estatística de dispersão da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PIRATA de profundidade de 10 m, sem controle de qualidade por intensidade do vento, para dado pontual e janela de 5x5 pixel, por nível de qualidade (NQ) 3-5 (juntos), para todo ano de 2018 e por estação do ano. Dados apresentado por: Coeficiente Angular e $R^2$ . . . . .	77
4.14	Estatística da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PIRATA para dado pontual, de nível de qualidade (NQ) 3-5 (juntos), eliminando dados com ventos de intensidade menor que 6 m/s, nas profundidades de 1 e 10 m: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ). . . . .	82

4.15	Estatística da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PIRATA para dado pontual, de nível de qualidade (NQ) 3-5 (separado), eliminando dados com ventos de intensidade menor que 6 m/s, nas profundidades de 1 e 10 m: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ). . . . .	83
4.16	Estatística de dispersão da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PIRATA de profundidade de 1 e 10 m, vento com intensidade maior ou igual a 6 m/s, para dado pontual no nível de qualidade (NQ) 3-5 (juntos), para todo ano de 2018 e por estação do ano. Dados apresentado por: Coeficiente Angular e $R^2$ . . . . .	84
4.17	Estatística da diferença entre as médias diárias de TSM satélite do GOES-16 e OSTIA com duas boias do Cabo Frio e uma de Niterói do PNBoia fixa para dado pontual, de nível de qualidade (NQ) 3-5 (junto), para todo ano de 2018 e Janeiro : quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ). . . . .	96
4.18	Estatística da diferença entre as médias diárias de TSM satélite do GOES-16 e OSTIA com PNBoia de deriva para dado pontual, de nível de qualidade (NQ) 3-5 (junto), para todo ano de 2018 e inverno, para a região da CBM, definido pela região de 45–30°S e 60–30°O: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ). . . . .	97
4.19	Estatística da diferença entre as médias diárias de TSM satélite do GOES-16 e OSTIA com PIRATA para dado pontual, de nível de qualidade (NQ) 3-5 (junto), para todo ano de 2018, verão e inverno, para a região entre 10°N a 10°S, vento com intensidade maior ou igual a 6 m/s: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ). . . . .	100



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABI - Advanced Baseline Imager  
AHI - Advanced Himawari Imagers  
ATLAS - Autonomous Temperature Line Acquisition System  
AVHRR - Advanced Very High Resolution Radiometer  
CDO - Climate Data Operators  
CHM - Centro de Hidrografia da Marinha  
GAC - Global Area Coverage  
GEOs - Geostationary Satellites  
GHRSSST - Group for High Resolution Sea Surface Temperature  
GOES - Geostationary Operational Environmental Satellite  
GOOS-BRASIL - Global Ocean Observing System do Brasil  
GTS - Global Telecommunications System  
IASI - Infrared Atmospheric Sounding Interferometer  
IQR - Interquartil Range  
IR - Infravermelho  
JPSS - Joint Polar Satellite System  
LAC - Local Area Coverage  
LEOs - Low-Earth Orbiting Satellites  
MSG - Meteosat Second Generation  
MW - Micro-onda  
NASA - National Aeronautics and Space Administration  
NESDIS - National Oceanic and Atmospheric Administration  
NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration  
NRT - Near Real Time  
OI - Interpolação Ótima  
OSI SAF - Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility  
OSPO - Office of Satellite and Product Operations  
OSTIA - Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis  
PIRATA - Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic  
PNBoia - Programa Nacional de Boias  
PNT - Previsão Numérica do Tempo  
SEVIRI - Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager  
SUOMI-NPP - Suomi National Polar-orbiting Partnership  
TB - Temperatura de Brilho  
TMI - Tropical Rainfall Measuring Mission Microwave Imager  
TSM - Temperatura da Superfície do Mar  
VIIRS - Visible Infrared Imager Radiometer Suite  
ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul  
ZCIT - Zona de Convergência Intertropical





## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Justificativa . . . . .	3
1.2 Objetivos . . . . .	4
1.2.1 Objetivo geral . . . . .	4
1.2.2 Objetivos específicos . . . . .	4
<b>2 REVISÃO TEÓRICA</b> . . . . .	<b>7</b>
2.1 Temperatura da superfície do mar (TSM) . . . . .	7
2.2 Estimativa da TSM . . . . .	12
2.3 Satélites meteorológicos-ambientais . . . . .	14
2.4 TSM obtida por medidas in situ . . . . .	17
2.5 Produtos de TSM por satélite . . . . .	18
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> . . . . .	<b>21</b>
3.1 Área de estudo . . . . .	22
3.2 Materiais . . . . .	26
3.2.1 In situ . . . . .	26
3.2.1.1 Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic (PI-RATA) . . . . .	26
3.2.1.2 Programa Nacional de Boias (PNBoia) . . . . .	28
3.2.2 TSM ABI-GOES-16 . . . . .	30
3.2.2.1 Processamento . . . . .	31
3.2.3 TSM padrão L4 . . . . .	34
3.2.3.1 OSTIA - Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis . . . . .	34
3.2.3.2 GHRSSST Level 4 OSPO Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis (GDS version 2) . . . . .	37
3.2.3.3 Geração dos produtos de TSM L4 . . . . .	37
3.3 Metodologia . . . . .	40
3.3.1 TSM ABI-GOES-16 vs. in situ . . . . .	40
3.3.2 ABI-GOES-16 vs. OSTIA e NOAA/NESDIS GEO-Polar Blended . . . . .	44
3.3.3 Estudo de caso . . . . .	45
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> . . . . .	<b>47</b>

4.1	Análise TSM ABI-GOES-16 vs in situ . . . . .	47
4.1.1	PNBoia - Boias de Deriva . . . . .	47
4.1.2	PNBoia - Boias Fixas . . . . .	59
4.1.3	PIRATA . . . . .	69
4.2	Análise entre os produtos L3 vs L4 . . . . .	88
4.2.1	TSM ABI-GOES-16 vs OSTIA . . . . .	89
4.3	Estudo de Caso: Ressurgência na costa do Rio de Janeiro . . . . .	100
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>107</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>111</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A temperatura da superfície do mar (TSM) é um importante regulador de diversos processos de interação oceano-atmosfera, como as trocas de calor, umidade e gás entre a atmosfera e o oceano, sendo um importante parâmetro de entrada em modelos de Previsão Numérica do Tempo (PNT) (DONLON et al., 2002; DONLON et al., 2012; EYRE, 2000). Medidas precisas e acuradas de TSM, tanto em séries temporais longas como em produtos *Near Real Time* (NRT) são, portanto, fundamentais para estudos de monitoramento do tempo, clima e aplicações operacionais em modelos de previsão. Com a evolução do sensoriamento remoto orbital, instrumentos-sensores a bordo de satélites geoestacionários e polares, que formam uma constelação capaz de observar todo o globo, são essenciais para monitorar e coletar informações de áreas que não contam com dados in situ, como as áreas remotas dos oceanos. Os dados in situ da temperatura do mar são importantes para se ter medidas diretas que podem ser usadas para validar e calibrar medidas indiretas como a TSM obtida por sensores orbitais, bem como amostrar profundidades abaixo da camada superficial (DONLON et al., 2002). No entanto, se os dados de temperatura superficial do mar forem coletados apenas por fontes in situ, o banco de dados será muito limitado, principalmente no que se refere à distribuição espacial horizontal. Além da cobertura global de TSM, sua resolução espacial e temporal também é importante, pois quanto maior (dependendo do sensor e plataforma), melhor a análise e o monitoramento da evolução de sistemas meteo-oceanográficos de escala sinótica à mesoescala, como ciclones tropicais e extra-tropicais, convecção atmosférica, nevoeiro marítimo e sistemas de brisas marítimas (DONLON et al., 2012).

Os produtos de satélite de TSM são gerados a partir da temperatura de brilho (TB) medida por sensores termais, do infravermelho ou micro-ondas, em canais de janelas atmosféricas (a região do espectro onde a absorção da radiação por gases é menor), convertida em TSM por meio de algoritmos que combinam fontes externas de informação, e.g., os algoritmos de transferência radiativa, que utilizam dados das condições atmosféricas obtida de outros sensores (ou outros canais) para eliminar todo efeito, principalmente de absorção do vapor d'água. Mas os algoritmos com melhor funcionamento e mais utilizados nos produtos de TSM são os obtidos a partir de equações de regressão derivadas de dados de TSM combinados a medidas in situ, e.g., boias fixas e de deriva (SOUZA et al., 2008). Há também equações de regressão derivadas a partir da TSM in situ medida por radiômetros, ou ainda da TSM simulada por modelos de transferência radiativa, mas as mais comuns são derivadas da TSM in situ coletados por boias e derivadores (MINNETT et al., 2019). A correção at-

mosférica realizada por estes algoritmos faz uso de uma simples subtração de canais com diferentes graus de influência da absorção do vapor d'água (conhecido em inglês como *split window* ou *multi-channel difference*) (SOUZA et al., 2008). A combinação dos dados in situ de temperatura do mar com dados orbitais de TB nos modelos de regressão, de modo geral, oferece estimativas bastante precisas de TSM (acurácia < 0,4 K, para cobertura global, definido por GHRSSST SCIENCE TEAM (2011)), em análises globais. A nível regional e local, no entanto, há uma série de fatores que podem gerar incertezas maiores, como: efeitos maiores da absorção do vapor d'água e de aerossóis (e.g., poeira, fumaça, cinzas vulcânicas), frentes termais acentuadas em regiões de maior gradiente de temperatura (e.g., zonas de confluência de correntes), e contaminação de nuvens. Sem contar as diferenças entre a temperatura mensurada pelo radiômetro termal que corresponde à camada mais superficial de pele (do inglês *skin* e *sub-skin*) ( $\sim 10 \mu\text{m}$  a 1 mm) e a temperatura medida pelos sensores in situ e.g., boias fixas e de deriva à  $\sim 0,5 - 1$  m de profundidade (TALLEY et al., 2011). Diferença esta que pode chegar a 2 K dependendo da estratificação termal (DONLON et al., 2002; GHRSSST SCIENCE TEAM, 2011). Portanto, seja qual for o uso da TSM, tanto para estudos e monitoramento, como entrada em modelos de previsão numérica, é preciso conhecer bem as possíveis fontes de incerteza, bem como selecionar o produto mais adequado para atender à finalidade requerida (DONLON et al., 2012). Por exemplo, para fins de estudos e monitoramento de processos regionais e de meso-escala, a TSM *skin*, *sub-skin* e *bulk* ( $\sim 1$  m), com resolução maior espacial e.g., 750 m (e.g., VIIRS) a 2 km (ABI-GOES) e temporal possível (e.g., horária, ABI), pode ser mais indicada. Enquanto que para processos globais, produtos diários, semanais e até mensais de TSM que representam uma camada superficial mais profunda ( $\sim 10$  m) com resolução horizontal mais grosseira (e.g., 6 km), e que integram dados de diferentes sensores, podem ser mais adequados.

Na escala global, a acurácia desejada para a TSM é de um viés máximo de 0,5 K em escalas temporais de menos de um dia e resolução de pelo menos 10 km (LAZARUS et al., 2007; SMITH, 2001). Dois exemplos de produtos padrões que seguem estritamente as recomendações do *Group for High Resolution Sea Surface Temperature* (GHRSSSTv2) e que foram especialmente desenvolvidos para o uso operacional como entrada em modelo de PNT e para a assimilação em modelos oceânicos são o *Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis* (OSTIA) (DONLON et al., 2012) e *NOAA/NESDIS GEO-Polar Blended* (OFFICE OF SATELLITE PRODUCTS AND OPERATIONS, 2015). Ambos combinam dados de diferentes sensores a bordos de satélites geoestacionários e polares, que operam tanto no infravermelho termal como no micro-ondas. Já para previsões de mesoescala com alta resolução espacial

e temporal a curto prazo (resolução inferior a 10 km e diários ou horários), as acurácias necessárias são da ordem de  $< 0,2$  K (DONLON, 2015; LAZARUS et al., 2007), o que torna o desafio ainda maior, visto que há uma série de fontes de incerteza nestes produtos de TSM de alta resolução (derivados de apenas um sensor), como as citadas anteriormente.

No conteúdo presente nesse trabalho, Capítulo (2) aborda conteúdos históricos e teóricos do sensoriamento remoto, assim como a física da temperatura da superfície do mar e sua medição, seja essa direta (in situ) ou indireta (satélite). A partir daí, apresenta-se os fundamentos teóricos com a descrição dos produtos e dados de TSM a serem utilizados (3). No Capítulo (4) são analisadas as comparações do produto de TSM do ABI-GOES-16 com dados in situ e comparações com produtos de processamento mais sofisticados (que utilizam mais de um sensor na sua constituição), além de apresentar um estudo de caso utilizando o produto ABI-GOES-16. Para finalizar, são apresentados conclusões e considerações finais no último Capítulo (5).

## 1.1 Justificativa

A TSM influencia não somente na interface oceano-atmosfera, mas também em níveis superiores da camada limite e até mesmo da troposfera, sendo portanto um parâmetro fundamental para estudos de processos de interação oceano-atmosfera. Além disso, a TSM da camada mais superficial do oceano (camada de pele, a  $\sim 10$   $\mu\text{m}$ ) é fundamental para a assimilação e validação de modelos acoplados de oceano-atmosfera (SOUZA et al., 2008). As fontes dos dados podem ser in situ, de reanálise ou estimado por satélite. Se os dados de TSM forem coletados apenas por fontes in situ, o conjunto de dados será limitado, tanto em quantidade como em distribuição espacial. A evolução tecnológica impulsiona novos instrumentos de satélites, melhorando a sua precisão, gerando melhores observações, principalmente para áreas que não contam com equipamentos in situ (DONLON et al., 2002).

O GOES-16, lançado no final de 2016 pelo programa *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES), é o primeiro satélite da 4<sup>a</sup> geração de satélites meteorológicos operada pela *National Environmental Satellite, Data, and Information Service/National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA/NESDIS) e declarado satélite operacional GOES-East em dezembro de 2017 ([www.goes-r.gov](http://www.goes-r.gov)). Esse satélite dá assistência à previsão do tempo, rastreamento de tempestades severas e pesquisas meteorológicas. A missão do GOES-16 é melhorar a qualidade dos dados e do monitoramento meteo-oceanográfico sobre as Américas, e seu sensor *Advanced Baseline Imager* (ABI) fornece o imageamento *Full Disk* (disco cheio),

sobre as Américas a cada 15 min, proporcionando cobertura de monitoramento de mesoescala, para previsão e aviso de tempo severo. Três versões de algoritmo foram desenvolvidas para a estimativa da TSM pelo programa GOES-16 (EUMETSAT/OSI SAF, 2018; IGNATOV, 2010): o algoritmo de regressão; o algoritmo de inversão do modelo de transferência radiativa, baseado na estimativa ótima; e o algoritmo híbrido, todos visando a realização de um produto mais preciso. Após testes de validação, o algoritmo de regressão foi escolhido como padrão por apresentar melhores resultados. O sensor ABI-GOES-16 permite a estimativa da TSM (sub pele) para cada pixel livre de nuvens sobre a água identificado pelo sensor a cada 15 min ao longo de todo o ciclo diurno, com uma resolução de 2 km. No Brasil, a TSM obtida por satélite também é um forte complemento aos dados in situ (SOUZA et al., 2008), além de fornecer melhor resolução espacial-temporal, possibilitando o avanço no monitoramento e estudo de fenômenos meteorológicos e oceanográficos, como a Confluência Brasil Malvinas (CBM), ressurgência costeira, nevoeiros marítimos-costeiros, linhas de instabilidade do Nordeste, entre outros casos.

O produto de TSM do ABI-GOES-16 (L3) já encontra-se em operação. Seus produtos permitem obter dados com maior resolução espacial-temporal, possibilitando maior representatividade de processos de menor escala, mas ao mesmo tempo possuem maior nível de incerteza associada. Para sua implementação operacional em modelos de PNT e oceânicos, uma validação entre os dados de TSM do GOES-16, com dados in situ e produtos padrões devem ser realizada e estudada, comprovando a acurácia e aplicabilidade dos dados gerados por este novo sensor.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é estudar o produto de TSM por satélite derivado do sensor ABI (a bordo do satélite geoestacionário GOES-16, lançado em 11/2016 e operacional desde 01/2018) de melhor resolução espacial-temporal, comparando com dados in situ e com produtos globais padrões L4 usados como entrada em modelos de PNT e de assimilação.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Comparar dados de TSM do produto ABI-GOES-16 com dados in situ de boias fixas e de deriva das redes *Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic* (PIRATA) e Programa Nacional de Boias (PNBoia),

para todo ano de 2018, na área de estudo (costa brasileira até 20°O, e latitudes entre 10°N e 45°S).

- Comparar o produto ABI-GOES-16 com produtos padrões de TSM (L4) usados operacionalmente como entrada em modelos de PNT e oceânicos de assimilação (i.e., OSTIA, NOAA *Geo-Polar Blended*).
- Distinguir regiões e/ou períodos com maior incerteza na comparação entre os produtos, e identificar as possíveis causas (processos envolvidos).
- Avaliar a representatividade de processos de mesoescala pelos produtos L3 e L4, em um estudo de caso.
- Sugerir melhorias nos produtos de TSM para a região de estudo, visando a aptidão do produto para o uso operacional como entrada no modelo de PNT regional, aspirando impactos positivos na meteorologia nacional.





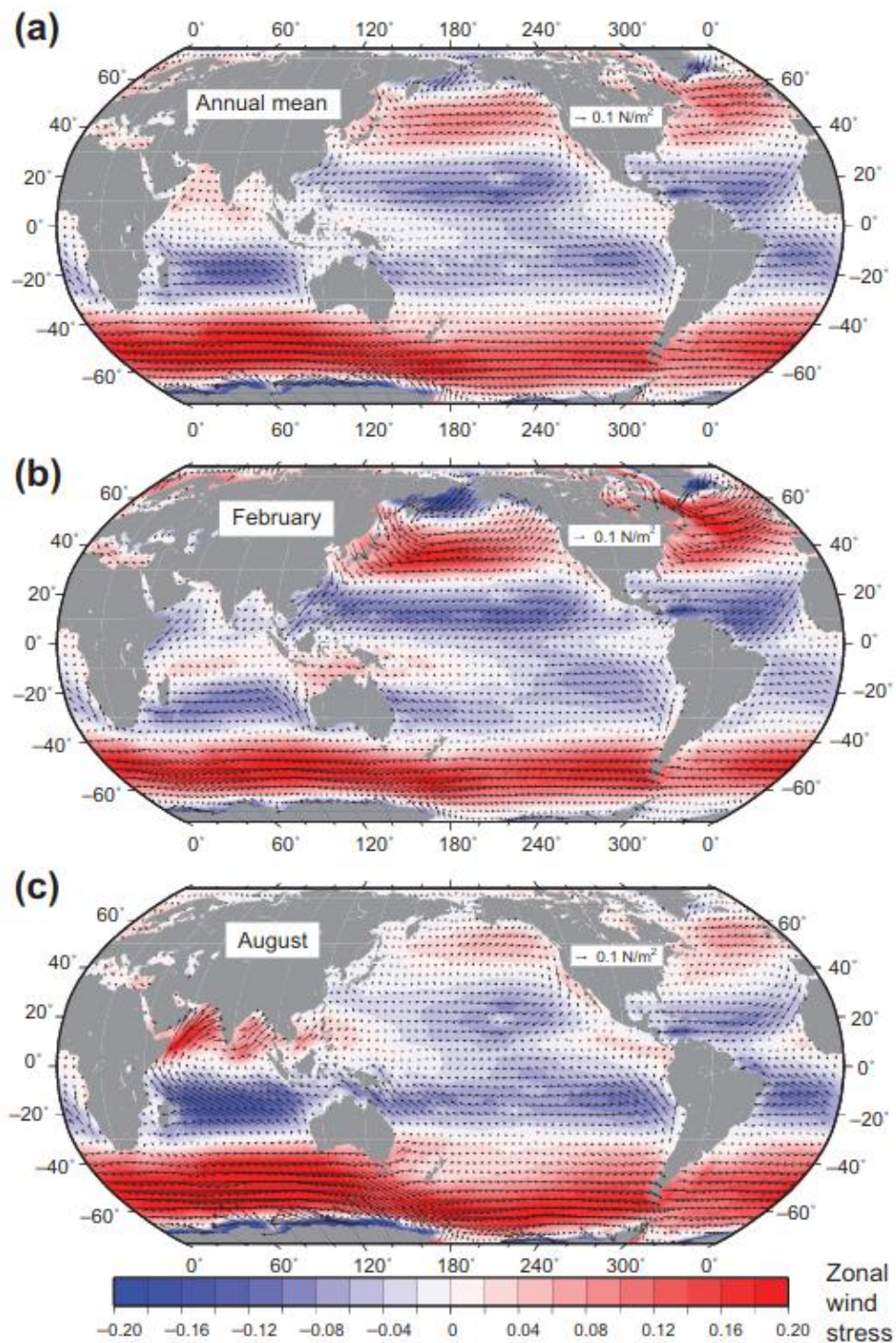
## 2 REVISÃO TEÓRICA

### 2.1 Temperatura da superfície do mar (TSM)

A tensão do vento de superfície é o principal fator que contribui para a circulação oceânica, através de uma camada de atrito (turbulento) próximo à superfície, sendo o vento também responsável pela transferência de energia entre a atmosfera e o oceano (TALLEY et al., 2011; STECH, 2008). A tensão global do vento e a tensão zonal do vento são mostradas na Figura 2.1, exibindo a variação sazonal nos meses representativos do verão e inverno, principalmente nas regiões de monção. Para a região do oceano Atlântico Tropical e Sudoeste podemos descrever algumas características dos ventos: trópicos com ventos alísios de leste; a região ao sul de 30°S de latitude é caracterizado pelos ventos de oeste; e os ventos médios anuais são mais intensos entre 40°S a 60°S (TALLEY et al., 2011).

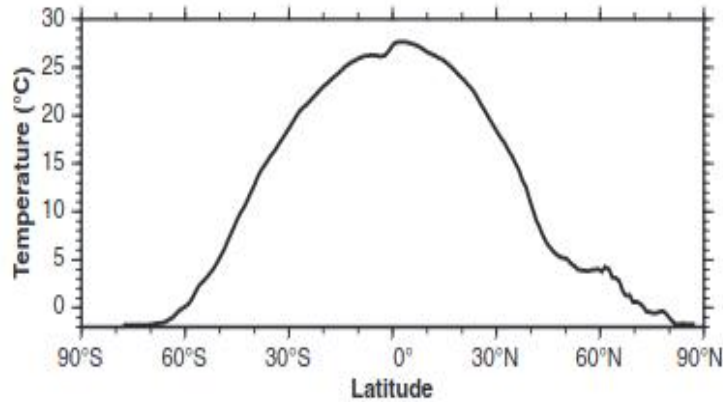
Assim como o vento, Talley et al. (2011) apresentou como a TSM do oceano aberto varia com a latitude. Calculado a média de todas as longitudes e exibido em função da latitude (Figura 2.2), a temperatura varia de 28 °C no equador até quase -1,8 °C em altas latitudes com gelo marinho.

Figura 2.1 - Tensão média do vento e tensão zonal do vento ( $N/m^2$ ): a) média anual, b) Fevereiro e c) Agosto. Dados de reanálise do NCEP 1968-1996 de Kalnay et al. (1996).



Fonte: Adaptada de Talley et al. (2011).

Figura 2.2 - Variação da temperatura da superfície com a latitude, utilizando dados climatológicos de Kalnay et al. (1996).



Fonte: Adaptada de Talley et al. (2011).

A estrutura vertical da temperatura na camada superficial do oceano ( $\sim 10$  m) é complexa e variável, dependendo de processos turbulentos forçados por fatores como o cisalhamento do vento superficial, correntes superficiais, e o balanços de calor na superfície. Dessa forma, a TSM medida e a sua profundidade representativa, vão depender da técnica de medição (instrumentação), da posição vertical do sensor (acima ou dentro da água), horário de aquisição e das forçantes citadas anteriormente. A TSM é, portanto, por definição, subdividida de acordo com as diferentes profundidades representativas dessa estrutura vertical (Figura 2.3) (DONLON et al., 2002; GHRSSST SCIENCE TEAM, 2011), sendo:

- TSM<sub>int</sub>: a temperatura da camada infinitamente fina da interface oceano-atmosfera, ou seja, na parte mais superior do gradiente de temperatura superficial. Ainda não se tem tecnologia para realizar essa medição.
- TSM<sub>pele</sub> (do inglês *skin*): é a temperatura equivalente à medida por um radiômetro termal, sendo representativa de uma profundidade de  $\sim 10 \mu\text{m}$  (camada-fina), ou seja, logo abaixo da interface oceano-atmosfera, onde os processos de transferência de calor dominam. A TSM de pele pode variar com a estratificação termal e com o comprimento de onda utilizado na medição, que geralmente é entre 3,9 a 12,3  $\mu\text{m}$ .
- TSM<sub>sub-pele</sub> (do inglês *subskin*): é representativa da camada logo abaixo de TSM<sub>pele</sub> onde os processos de transferência de calor molecular e viscoso co-

meçam a dominar. A temperatura pode variar em minutos e sofre influência do aquecimento solar, sendo sensível ao aquecimento diurno. Sua medição é realizada por radiômetros de micro-ondas (MW) de baixa frequência (6 a 10 GHz), com profundidades de penetração na água superiores a 1 mm. Essa profundidade sub-pele também é usada para denominar produtos de TSM por satélite estimados por radiômetros termais com modelos de regressão que usam dados in situ de balde, como se fosse uma profundidade ponderada entre a  $TSM_{pele}$  e  $TSM_{balde}$ .

- $TSM_{profundidade}$  (do inglês *depth*) ou de balde (do inglês *bulk*): é aquela correspondente à profundidade das medidas in situ obtidas por termômetros, que geralmente variam em torno de 0,5 a 3 m (mas normalmente encontra-se em  $\sim 0,5-1$  m), onde os processos de transferência de calor turbulentos dominam. A  $TSM_{balde}$  pode variar em horas (dependendo da profundidade) e sofre influência do aquecimento solar. Sua profundidade correspondente deve sempre ser citado, e tradicionalmente, a  $TSM_{balde}$  é medida usando sensores de temperatura em boias, perfilhadores, derivadores e navios.
- $TSM_{fnd}$ : a TSM de fundação (do inglês *foundation*) ou fundamental consiste na temperatura superficial da coluna de água livre da influência do aquecimento diurno ou resfriamento noturno, que fica em torno de 10 m de profundidade. Apenas medições in situ são capazes de medir a  $TSM_{fnd}$ , já que os sensores remotos ficam restritos à camada mais superficial de pele e sub-pele. Para determinar a  $TSM_{fnd}$  por satélite é necessário procedimento de análise combinando medidas radiométricas (sob condições específicas: noturnas ou com vento  $> 6$  m/s) de pele e sub-pele com medidas in situ.

A fim de quantificar as diferenças térmicas verticais entre as TSMs, o parâmetro  $\Delta T$  pode ser definido por:

$$\Delta T_1 = TSM_2 - TSM_1 \quad (2.1)$$

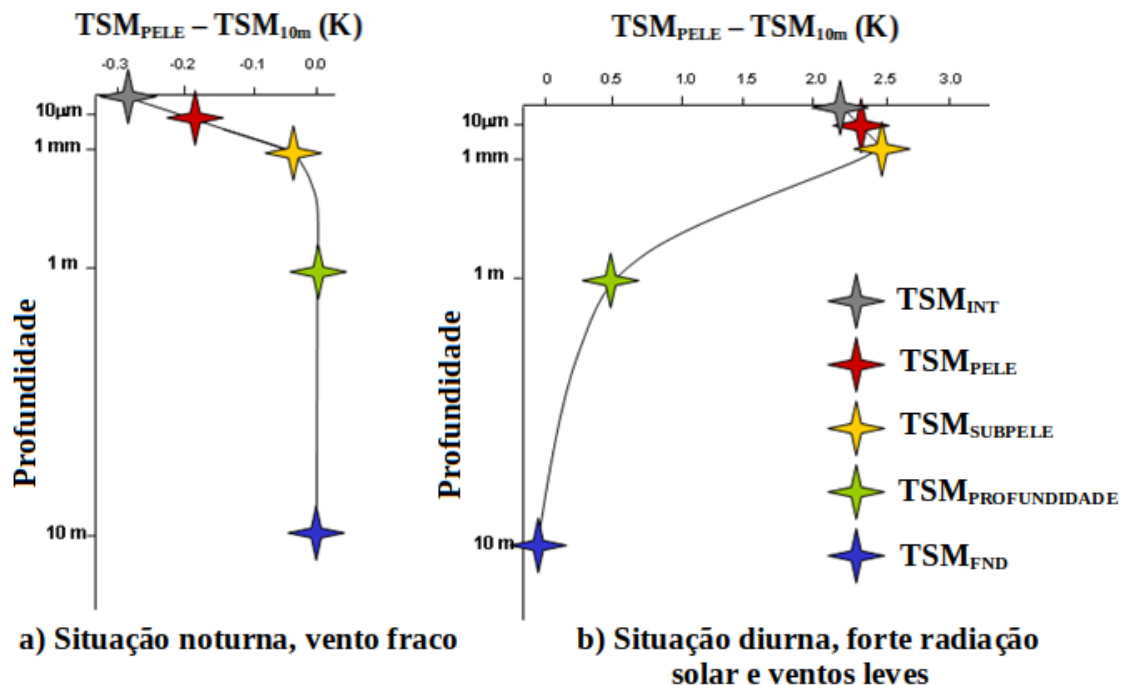
No caso da diferença entre a  $TSM_{balde}$  (in situ) e a  $TSM_{pele}$  (medida por radiômetros termais) é dada por:

$$\Delta T = TSM_{pele} - TSM_{balde} \quad (2.2)$$

Sendo que o valor negativo de  $\Delta T$  indica uma  $TSM_{pele}$  mais fria, o que geralmente

ocorre no período noturno ou diurno com alta intensidade de vento (Figura 2.3a). Neste caso, a  $TSM_{pele}$  é geralmente cerca de 0,3 K mais fria que a  $TSM_{balde}$ , e esta fica equivalente à  $TSM_{fnd}$ . Por isso, produtos que estimam a  $TSM_{fnd}$  por satélite geralmente utilizam apenas medidas de  $TSM_{pele}$  e  $TSM_{sub-pele}$  noturnas, ou com vento acima de 6 m/s (capaz de quebrar a estratificação termal da coluna d'água). No caso do período diurno, com baixa intensidade de vento, quando tem-se maior estratificação termal devido à insolação, o  $\Delta T$  deve ficar positivo, com uma  $TSM_{pele}$  e  $TSM_{sub-pele}$  mais quente que a  $TSM_{balde}$  ( $\sim 2,0$  K) e  $TSM_{fnd}$  (Figura 2.3b). A diferença entre  $TSM_{pele}$  e  $TSM_{balde}$  é inversamente proporcional à velocidade do vento, devido ao vento afetar as ondas da superfície do mar e o fluxo entre oceano-atmosfera, que então afeta a camada de mistura da água (TALLEY et al., 2011). Inclusive, alguns modelos adotam que  $\Delta T$  é inversamente proporcional à velocidade do vento, como realizado por Saunders (1967) citado por Dourado e Caltabiano (2008).

Figura 2.3 - Perfil Vertical de TSM. Diagrama esquemático mostrando um perfil vertical da camada da superfície do oceano durante a) noite ou durante o dia com vento moderado para forte ( $> 6$  m/s) e b) dia com aquecimento solar, com ventos de intensidade leve ( $< 6$  m/s).



Fonte: Adaptada de Donlon et al. (2002).

Donlon et al. (1999) realizaram experimentos no oceano Atlântico com objetivo de compreender a relação entre vento e  $\Delta T$ . Percebeu-se que  $\Delta T$  aumenta com vento menores que 6 m/s, devido à estratificação térmica. Nos períodos de alta insolação, registrou-se um  $\Delta T$  menor que -1,5 K, enquanto no período noturno a variação de  $\Delta T$  é reduzida, sendo menores que 0,5 K. No geral, a variação de  $\Delta T$  diminui com velocidades do vento  $> 6$  m/s, e o valor médio aproxima-se de  $0,14 \text{ K} \pm 0,1 \text{ K}$  (DOURADO; CALTABIANO, 2008).

Portanto, conhecer e caracterizar bem as diferenças entre as TSMs determinadas por cada método de medição é fundamental para fazer a junção correta destes termos e o uso adequado de cada um (DONLON et al., 2002).

## 2.2 Estimativa da TSM

Para as medidas de TSM feitas do espaço, a calibração dos instrumentos é uma etapa fundamental para garantir a precisão e confiabilidade, primeiramente dos dados radiométricos medidos, e posteriormente, dos produtos estimados por satélite. Se bem feita a calibração, e caracterizado as incertezas associadas à medição, a qualidade do produto vai depender da precisão do algoritmo e sua capacidade de eliminar interferências indesejáveis pelo controle de qualidade, como a atenuação atmosférica e a presença de nuvens, no caso dos radiômetros termais (MW são pouco atenuados pelas nuvens). Como mencionado na introdução, os algoritmos que tem apresentado melhor desempenho na estimativa da TSM por satélite são aqueles que combinam medidas in situ de TSMbalde com a temperatura de brilho (TB) medida pelos radiômetros, em análises de regressão (VAZQUEZ et al., 1998; SOUZA et al., 2008):

$$TSM_{sat} = a + bT_4 + c(T_4 - T_5)TSM_{climatológica} + d(T_4 - T_5)[\sec \Theta - 1] \quad (2.3)$$

onde

$TSM_{sat}$  = a estimativa TSM derivada de satélite;

$T_4$  e  $T_5$  = temperatura de brilho de diferentes canais janela, respectivamente;

$TSM_{climatológica}$  = primeiro palpite (*first guess*) de TSM;

$\Theta$  = ângulo zenital de visada do sensor do satélite; e

$a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  = coeficientes estimados a partir da regressão entre medições coincidentes in situ e por satélite.

A diferença entre as TBs de canais janela, com diferentes graus de influência da

absorção do vapor d'água, permite remover o efeito da atenuação do vapor d'água num procedimento conhecido como *split window*, *dual window* ou *triple window difference*. *Split window* realiza essa correção atmosférica empregando uma subtração dos canais, 8,5; 10,3 e 12,3  $\mu\text{m}$  no caso do GOES-16, tornando o algoritmo mais robusto a diferentes condições atmosféricas (PICART; MARSOUIN, 2018; MERCHANT et al., 2009; PETRENKO et al., 2019).

A TSMclimatológica (REYNOLDS et al., 2002) é usada no algoritmo como um primeiro palpate (*first guess*) de um valor próximo ao que deve ser a TSM<sub>sat</sub> estimada. Isso é uma estratégia usada para evitar que saiam valores muito fora do normal (esperado) por algum erro do algoritmo (no caso de valores extremos – fora da curva de calibração), influência atmosférica não corrigida (gases e aerossóis) ou interferência de nuvens (principalmente nuvens finas difíceis de serem identificadas). A contaminação por nuvens e gelo marinho são aliás os principais responsáveis por estimativas errôneas da TSM<sub>sat</sub>, por exemplo, nuvens baixas (próximas à superfície) tem temperaturas parecida com a da superfície, fazendo com que não apresente muito contraste nas imagens do infravermelho térmico (IR), torna-as difícil de identificar. A tentativa da eliminação destes efeitos é realizada por procedimentos anteriores à aplicação do algoritmo com a aplicação do que se chama de máscara de nuvens (e.g., um produto gerado operacionalmente na suite de produtos GOES-16). A máscara de nuvens é obtida pela combinação de canais do visível, no período diurno, e do infravermelho termal (noturno e diurno) usando limiares de refletividade e de TB e análise de gradientes (PETRENKO et al., 2010).

Como o modelo de regressão utiliza a TSM in situ para estimar a TSM<sub>sat</sub>, é preciso ter o cuidado ao fazer a equivalência entre a TSM<sub>balde</sub> e a TSM<sub>pele</sub>. Na prática, porém, se assume que a TSM<sub>sat</sub> estimada por modelos de regressão são correspondentes à TSM<sub>balde</sub> ou à TSM<sub>sub-pele</sub> (intermediária) já que há uma compensação pelo uso dos dados in situ (a maioria adquirida de boias, derivadores e navios). A TSM<sub>balde</sub> é convencionalmente considerada representativa da profundidade de 1 m, mas cada método de medição in situ possui variações que podem ser de 0,2 até 7 m, dependendo do tipo de coleta (EMERY et al., 2001). A imprecisão na determinação da profundidade pelo sensor de pressão também é um fator de incerteza nestas medidas, que se propagam na estimativa da TSM<sub>sat</sub>.

Além da variação na profundidade representativa de TSM medida pelos radiômetros (de pele) e pelos medidores in situ (de balde), uma outra fonte de incerteza na estimativa da TSM<sub>sat</sub> que deve ser mencionada é a calibração dos termômetros

a a bordo das plataformas in situ, que nem sempre é trivial. Boias fixadas em regiões remotas de difícil acesso, por exemplo, demandam um esforço grande para a manutenção, que nem sempre é possível realizar em períodos tão frequentes quanto o desejável. A precisão dos dados de TSM in situ dependem dos dados de profundidade e do conhecimento da estabilidade e desvio da calibração do sensor.

Além de gerar os modelos de regressão para a estimativa da TSM<sub>sat</sub>, as observações in situ são utilizadas para a identificar, caracterizar e corrigir vieses sistemáticos associados aos algoritmos de recuperação de satélite. Para os sensores que operam na faixa do IR, as correções são usadas para ajudar a eliminar os efeitos da contaminação de nuvens e aerossóis, enquanto que para os sensores de MW são usados para eliminar os efeitos da contaminação por precipitação e do solo (no caso de regiões costeiras) (DONLON et al., 2012; EYRE, 2000). O algoritmo de regressão também gera vieses locais (regionais e sazonais) devido à não-linearidade gerada pela dependência da absorção do vapor d'água com a temperatura. Estes vieses precisam ser corrigidos, principalmente para os casos extremos de umidade e temperatura. Neste caso, geralmente são usadas TB simuladas a partir de perfis atmosféricos de modelos PNT e dados climatológicos de TSM. A correção é feita aplicando o algoritmo de regressão às TBs simuladas e ponderando as diferenças obtidas com a TSM<sub>sat</sub> estimada (BORGNE et al., 2011; BORGNE et al., 2012).

### 2.3 Satélites meteorológicos-ambientais

O uso de dados de satélites meteorológicos-ambientais evoluiu muito desde os anos 1990, fazendo com que a PNT avançasse de forma substancial nas últimas décadas. O impacto mais positivo foi no Hemisfério Sul, devido a sua deficiência em dados in situ. Desde 2000, cada vez mais dados de satélites são assimilados nos Centros Meteorológicos, com resultados positivos (EYRE, 2000).

Os Centros Meteorológicos conseguem dados contínuos e de longo prazo com constelações de satélites geoestacionários (*geostationary satellites* - GEOs) e polares (*low-Earth orbiting satellites* - LEOs). Os GEOs, localizados a  $\simeq 36.000$  km, tem órbita equatorial quase circular, com a mesma velocidade angular que a rotação da Terra, fazendo com que tenha um campo de visada fixa. Isso permite uma alta frequência de observação: e.g., 15 minutos para imagem completa da área total observada (*full Earth's disk*) ou com mais frequência, se a área em questão for menor. Devido à alta resolução temporal (imagem *full Earth's disk* a cada 15 minutos), os produtos gerados pelos GEOs são muito usados na previsão do tempo e assimilação de dados em modelos numéricos de previsão de tempo em quatro dimensões na previsão



imediate (*nowcasting*). Mas a sua grande limitação é a incapacidade de observar regiões polares. Já os satélites polares são usualmente colocados em órbita quase polar e sincronizada com o sol a uma altitude de 600 a 1000 km, com tempo de revisita nos polos de cerca de  $\simeq 100$  minutos (THÉPAUT, 2003). Seus instrumentos geralmente escaneiam um trecho terrestre, fornecendo uma cobertura total de cada ponto da Terra a cada 12 horas (dependendo da altitude). Se a órbita é sincronizada pelo sol, as observações são fornecidas no mesmo horário e local todos os dias. Por estarem numa altura muito mais baixa do que os GEOs, os LEOs podem contar ainda com sensores de MW em sua plataforma - GEOs não tem sensores de MW, pois necessitam de antenas maiores, devido à grande distância entre o satélite e o plano terrestre, e o baixo sinal de radiação emitida nesta faixa espectral (EYRE, 2000; THÉPAUT, 2003).

O sensor radiômetro a bordo do satélite não mede a temperatura, e sim a radiância (L) que atinge o topo da atmosfera em determinada frequência ( $\nu$ ) (ou comprimento de onda), e é interceptada pelo sensor. A radiância pode ser relacionada aos parâmetros geofísicos através da equação de transferência radiativa, como descrita resumidamente a seguir (THÉPAUT, 2003):

$$L(\nu) = \int_0^\infty B(\nu, T(Z)) \frac{d\tau(\nu)}{dz} dz \quad (2.4)$$

- + emissão da superfície
- + reflexão da superfície
- + dispersão da superfície
- + contribuição da nuvem/chuva

onde  $B(\nu, T(Z))$  é a radiância de Planck para uma temperatura T na altitude Z, e  $\tau(\nu)$  a transmitância atmosférica na altitude z (THÉPAUT, 2003). A função de Planck descreve uma relação entre a intensidade da radiação emitida por um corpo negro em um dado comprimento de onda e a temperatura do corpo negro. O inverso da função de Planck é a temperatura equivalente de corpo negro, ou temperatura de brilho (TB). Na faixa do infravermelho termal de ondas longas a TB do oceano é próxima à sua temperatura real, já que a emissividade (razão entre o que é emitido efetivamente pelo que seria emitido por um corpo negro) é próxima de 1 ( $\varepsilon \approx 0,98$ ), divergindo muito pouco na faixa de 3 - 14  $\mu\text{m}$ , com a salinidade e rugosidade da superfície do mar (SOUZA et al., 2008). Já na faixa do MW, por outro lado, a atenuação atmosférica é ínfima (e.g., 10 GHz), insensível à atenuação do vapor d'água, além da TSM não ser afetada pela presença de aerossóis. Entretanto a emissividade nesta faixa é suscetível

a variação conforme o estado do mar, e os algoritmos devem introduzir formas de eliminar os efeitos da rugosidade e espuma na superfície do mar (SOUZA et al., 2008; PETTY, 2006).

Os sensores que operam na faixa do infravermelho termal são os mais comuns, usados para estimativas de TSM, como o AVHRR a bordo da série NOAA e MetOP e o ABI a bordo do GOES-16. Os sensores que estão a bordo de satélites polares possuem resolução espacial nominal ao nadir  $\sim 1$  km ou menos, e acurácia radiométrica de  $\sim 0,3 - 0,6$  K. A bordo de satélites geoestacionários a resolução espacial era mais grosseira (4 km no IR e 1 km no VIS), até o advento da nova geração de satélites ambientais, como o sensor ABI a bordo do GOES-16, que possui canais com 2 km de resolução nominal no IR e de 0,5 - 1 km no VIS. Instrumentos de IR são capazes de alcançar altos níveis de precisão devido às suas características intrínsecas, sistemas de calibração confiáveis e procedimentos de calibração e contam (normalmente) com acurácia de 0,5-0,8 K, com erro adicional com a presença ou ausência da camada de pele (TALLEY et al., 2011). Uma grande limitação, porém, para a amostragem da superfície terrestre é sua incapacidade de receber a radiação em locais que contenha nuvens, pois as nuvens atenuam essa radiação emitida/refletida da superfície, limitando a continuidade temporal e espacial. Dessa forma, as estimativas de medições de TSM feitas por sensores de IR são obtidas somente em condições de céu claro.

Já a TSM derivada de radiômetros de MW passivo pode ser obtida em todas as condições meteorológicas, exceto nuvens com chuva e gelo. A medida radiométrica é obtida na faixa de 6 - 10 GHz, para estimar a TSM, descontando o efeito da rugosidade da superfície do oceano, que altera a sua emissividade. O efeito da rugosidade é removido das medidas combinando informações obtidas nos canais polarizados horizontalmente e verticalmente. Após a remoção deste efeito, é gerando uma relação única entre as TB e a TSM. A vantagem de se utilizar sensores de MW (6 - 10 GHz) para a estimativa da TSM é a capacidade da radiação de penetrar com pouca atenuação nas nuvens e de não ser sensível ao vapor de água presente na atmosfera, assim como o espalhamento e absorção dos aerossóis, proporcionando uma visão da superfície do oceano sem interrupção. A maior limitação são as poucas plataformas que possuem estes sensores (em comparação aos radiômetros de IR), além da resolução espacial ser muito menor ( $\sim 25$  a 50 km) devido à pouca quantidade de radiação emitida pelo oceano na faixa do MW, fazendo com que integração de área aumente e consecutivamente, diminua a resolução espacial (SOUZA et al., 2008). Para contornar a limitação do bloqueio das nuvens no caso dos sensores de IR, e a resolução grosseira dos sensores de MW, é realizada uma junção das estimativas de TSM por

ambos sensores em produtos mais refinados (nível de processamento L4), obtendo assim dados contínuos de TSM em alta resolução espacial ( $\sim 6$  km) e produzidos diariamente (DONLON et al., 2012; CHIN et al., 2017).

Além das escolhas dos sensores e canais a serem utilizados nas estimativas de TSM, a escolha do satélite, seja esse GEOs e/ou LEOs, nos dirá qual será a periodicidade dos dados e sua resolução espacial-temporal. Os dados obtidos dos sensores a bordo dos GEOs nos permite obter por exemplo, dados horários, incluindo o ciclo diurno, e uma melhor cobertura espacial com a composição temporal de imagens a cada 1 hora (eliminando assim parte do bloqueio das nuvens) (DONLON et al., 2012; MINNETT et al., 2019).

O importante é conhecer bem as vantagens e limitações de cada sensor e produto de TSM gerada, e saber os requisitos mínimos necessários para atender as diferentes aplicações. Para os sensores de IR, as nuvens são a maior fonte de erro, assim como os aerossóis, a degradação do sensor e falha do algoritmo de recuperação de TSM sob condições atmosféricas anômalas (EMERY et al., 1994). Para o MW passivo, a chuva e a ambiguidade na emissividade da superfície (causado pelo conhecimento incompleto do vetor do vento da superfície) são as principais causas de incerteza, assim como a contaminação do lóbulo lateral, onde a maior quantidade de energia é enviada na direção da antena, mas quantidades menores de energia são enviadas em outras direções, e em um dado momento, o feixe principal recebe energia retroespalhada (DONLON et al., 2012; ELÍA; ZAWADZKI, 2000).

Indiscutivelmente, toda medida sofre de erros aleatórios e sistemáticos. O importante é conhecer bem as fontes de erro e saber como tratá-las durante o processamento e análise dos dados até obter o produto final. Para isso é necessário fazer a caracterização das incertezas associadas a cada produto de TSM, comparando-os entre si e com dados de referência in situ e produtos padrões de alta qualidade (DONLON et al., 2012). Além de auxiliar na escolha dos produtos, conhecendo-se as fontes e o comportamento dos erros, é possível também verificar como eles podem se propagar nas diversas aplicações, como por exemplo, para a entrada em modelos de PNT e análises de clima.

## **2.4 TSM obtida por medidas in situ**

Antes da criação dos satélites e popularização de seus dados nos estudos de clima e PNT, as observações de TSM in situ já tinham grande papel no monitoramento das variabilidades climáticas, por mais que os dados não tivessem uma ampla dis-

tribuição pelo globo (KENT; TAYLOR, 2006). Boa parte dos dados de TSM obtidos até 1941 eram coletados pelo o método de balde, inicialmente com estrutura de madeira, e posteriormente de lona, lançado do *deck* do navio (FOLLAND; PARKER, 1995). Durante a Segunda Guerra Mundial, devido ao perigo de ataque inimigo, principalmente à noite, fez com que boa parte dos dados coletados fossem da sala de máquinas ao invés do método de balde. Após a guerra, a leitura era feita tanto na de sala de máquinas e com o balde (este com um isolamento mais moderno). Os termômetros de reversão (mercúrio) foram muito utilizados por terem exatidão e a precisão de 0,004°C e 0,002°C, respectivamente (TALLEY et al., 2011). Outro instrumento utilizado são os sensores de casco, que medem a TSM através do casco ou de um orifício no lado do navio. Suas medidas são confiáveis e superiores aos dois métodos já explicados, pois suas medidas são feitas em profundidades maiores e conta com equipamento mais sensível, mas relativamente mais caro (KENT; TAYLOR, 2006). Na atualidade, os termistores são usados para a maioria das medições in situ, e os melhores termistores, usados com frequência em instrumentos oceanográficos, têm acurácia de 0,002°C e precisão de 0,0005-0,001°C (TALLEY et al., 2011).

Há aproximadamente 20.000 a 30.000 observações de boias de TSM acessíveis em tempo real, pelo *Global Telecommunications System* (GTS). Por mais que esses dados não cubram todas as áreas dos oceanos igualmente, são necessários para a identificação, caracterização e correção do viés nos dados de TSM obtidos por satélites com sensores de IR e MW, causado pelas contaminações citadas anteriormente (DONLON et al., 2012). Boa parte dos processos que geram o viés nas estimativas de TSM por satélite não podem ser controlados ou previstos, então uma rede in situ otimizada pode ser usada para corrigir este viés em larga escala (ZHANG et al., 2006).

## 2.5 Produtos de TSM por satélite

Existem diversos produtos de TSM por satélite, que podem ser caracterizados pelos dados de entrada (i.e., sensor/satélite), algoritmo usado e nível de processamento. Nos tópicos anteriores já foram descritos os tipos de sensores, satélites, e a forma geral dos algoritmos mais comuns. Nesta subseção serão descritos de forma breve os produtos de acordo com os níveis de processamento.

O nível 0 (L0) de processamento dos dados radiométricos consiste nos dados brutos coletados pelos sensores. O nível 1 (L1) são os dados radiometricamente calibrados e geolocalizados e o nível 2 (L2) já é o primeiro nível com o produto geofísico, no caso a TSM após a aplicação do algoritmo. Nesta etapa de processamento são realizadas uma série de procedimentos antes e após a aplicação do algoritmo, como

a aplicação das máscaras de continente, nuvens e gelo marinho, e um controle de qualidade dos dados de saída. Este controle de qualidade é realizado pela comparação do dado estimado com um dado de referência, que geralmente é derivada de uma base climatológica (REYNOLDS et al., 2002). Alguns produtos padrões ainda aplicam métodos de interpolação para gerar mapas mais suavizados que representam uma continuidade espacial mais homogênea e realista, eliminando dados contaminados de nuvens num controle de qualidade, e.g. *Optimal Interpolation* (REYNOLDS et al., 2002). O produto L2 é gerado em tempo quase real (NRT) na projeção satélite, sem aplicar nenhuma re-amostragem aos dados originais.

Para a geração do produto de nível 3 (L3), no terceiro nível de processamento, são aplicadas técnicas de processamento de imagem (PDI) mais avançadas como a transformação dos dados em uma grade regular (*gridding*) em determinado sistema de coordenadas e projeção, e a composição de imagens, do mesmo sensor, mas gerados em períodos diferentes. Por exemplo, médias horárias e diárias com imagens obtidas a cada 15 min de um sensor a bordo de um satélite geoestacionário (e.g. ABI-GOES-16), ou um mapa global diário composto por cenas de um satélite polar (e.g. AVHRR-NOAA).

Por fim, temos ainda o nível 4 de processamento (L4), onde são usados dados externos para compor o produto final com processamentos ainda mais avançados de análises dos dados. Os dados externos podem ser *in situ*, de outros sensores/plataformas, e ainda saídas de modelos numéricos, dependendo do tipo de produto e sua finalidade.

Uma análise de TSM para a geração do produto L4 é designada a produzir o melhor dado de TSM para um determinado horário ou local, realocando-os em uma grade regular, por mais que seus dados de medidas sejam esparsos e de grade irregular (DONLON et al., 2012).

Dois exemplos de produtos L4 são o *NOAA Geo-Polar Blended L4 foundation SST*, gerado pela NOAA, e o *Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis* (OSTIA) desenvolvido pelo UK-Met-Office. Ambos serão utilizados no presente trabalho e descritos em mais detalhe na seção de Materiais e Métodos. Estes produtos foram desenvolvidos especialmente para o uso como entrada em modelos PNT e para a assimilação em modelos oceânicos, e reúnem dados de diversos sensores de IR e MW, polares e geoestacionários, bem como dados *in situ* coletados no sistema GTS. Sendo operacionais, estes produtos são gerados todos os dias, com uma latência de 24 horas, o que ainda o classifica como *near real time* para entrada em modelos numéricos, já que o oceano não muda tão rapidamente numa escala global. Os pro-

dados padrões operacionais seguem uma série de especificações elaboradas por um grupo internacional denominado de *Group for High Resolution SST* (GHRSSST), e descritas em documentos técnicos (GHRSSST SCIENCE TEAM, 2011).

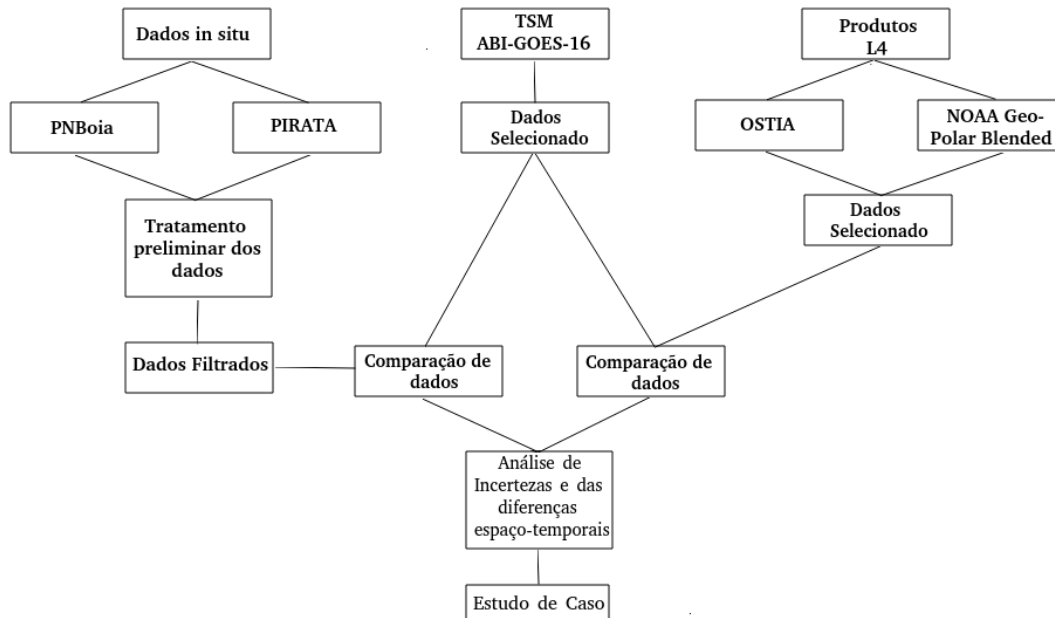
Enquanto que os produtos L4 permitem obter um mapa homogêneo, contínuo e de alta qualidade para o uso em modelos de PNT e oceânicos, os produtos L2 e L3 permitem obter dados com maior resolução temporal e espacial, permitindo uma maior representatividade de processos de menor escala espaço-temporal, o que pode ser vantajoso para o monitoramento de sistemas de previsão em escalas regionais. Uma outra vantagem dos produtos L2 e L3 é que são representativos da TSM<sub>pele</sub> ou sub-pele, que é sensível às variações de aquecimento do ciclo diurno, enquanto que o L4 é representativo da TSM<sub>fund</sub> ( $\sim 10\text{m}$ ) (PETRENKO et al., 2019; MINNETT et al., 2019). Este é um ponto fundamental que difere as aplicações da TSM ABI-GOES-16, no monitoramento de processos meteoceanográficos, por exemplo. No entanto, como os produtos L2 e L3 possuem maior nível de incerteza associada, além da descontinuidade espacial devido ao bloqueio de nuvens por exemplo (no caso dos sensores de IR), é necessário uma série de estudos para viabilizar a sua aplicação operacional em modelos de PNT e oceânicos regionais.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho encontra-se dividido nas seguintes etapas principais (Figura 3.1):

- Seleção e controle de qualidade dos dados de TSM in situ de boias de deriva e fixa;
- Comparação dos dados in situ com o produto de TSM ABI-GOES-16;
- Seleção e aquisição dos produtos globais L4 OSTIA e Geo-Polar-Blended;
- Comparação dos dados de TSM ABI-GOES-16 com os produtos L4 e análise das diferenças temporais e espaciais;
- Estudo de caso para avaliar a representatividade de processos de mesoescala pelos produtos L3 e L4.

Figura 3.1 - Fluxograma Resumindo a Metodologia. Da esquerda para direita encontra-se três principais estágios: Dados in situ; TSM ABI-GOES-16; e Produtos L4. As etapas desses tópicos são a coleta de dados, tratamento preliminar, comparação de dados e análise de incerteza e das diferenças espaço-temporal, finalizando com um estudo de caso.



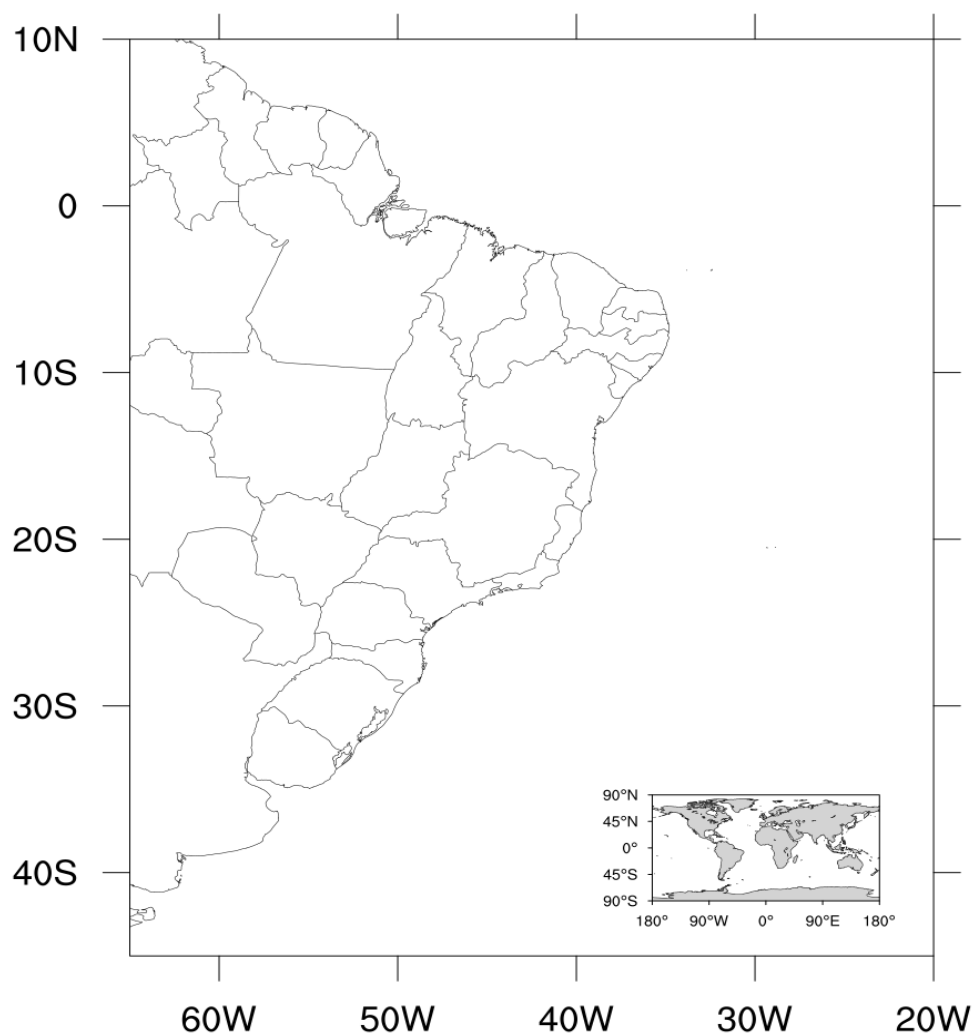
Fonte: Produção da Autora.

### 3.1 Área de estudo

A área de estudo deste trabalho foi definida com a intenção de estudar toda a região da costa do Brasil e oceano adjacente, de 65°O até 20° O, e latitudes entre 10°N e 45°S, englobando a região marítima do qual o Brasil é responsável segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM), (METAREA V), e áreas adjacentes (Figura 3.2). A maioria das boias fixas encontra-se no Atlântico Tropical (para o PIRATA) e ao longo da costa do Brasil (PNBoia), como mostram as Figuras 3.5 e 3.6 da seguinte sub-sessão (3.2). O programa PNBoia também conta com diversas boias de deriva na região Sudoeste e Sul do Oceano Atlântico . Para ambos os programas, foram selecionadas apenas as boias dentro da região de estudo.



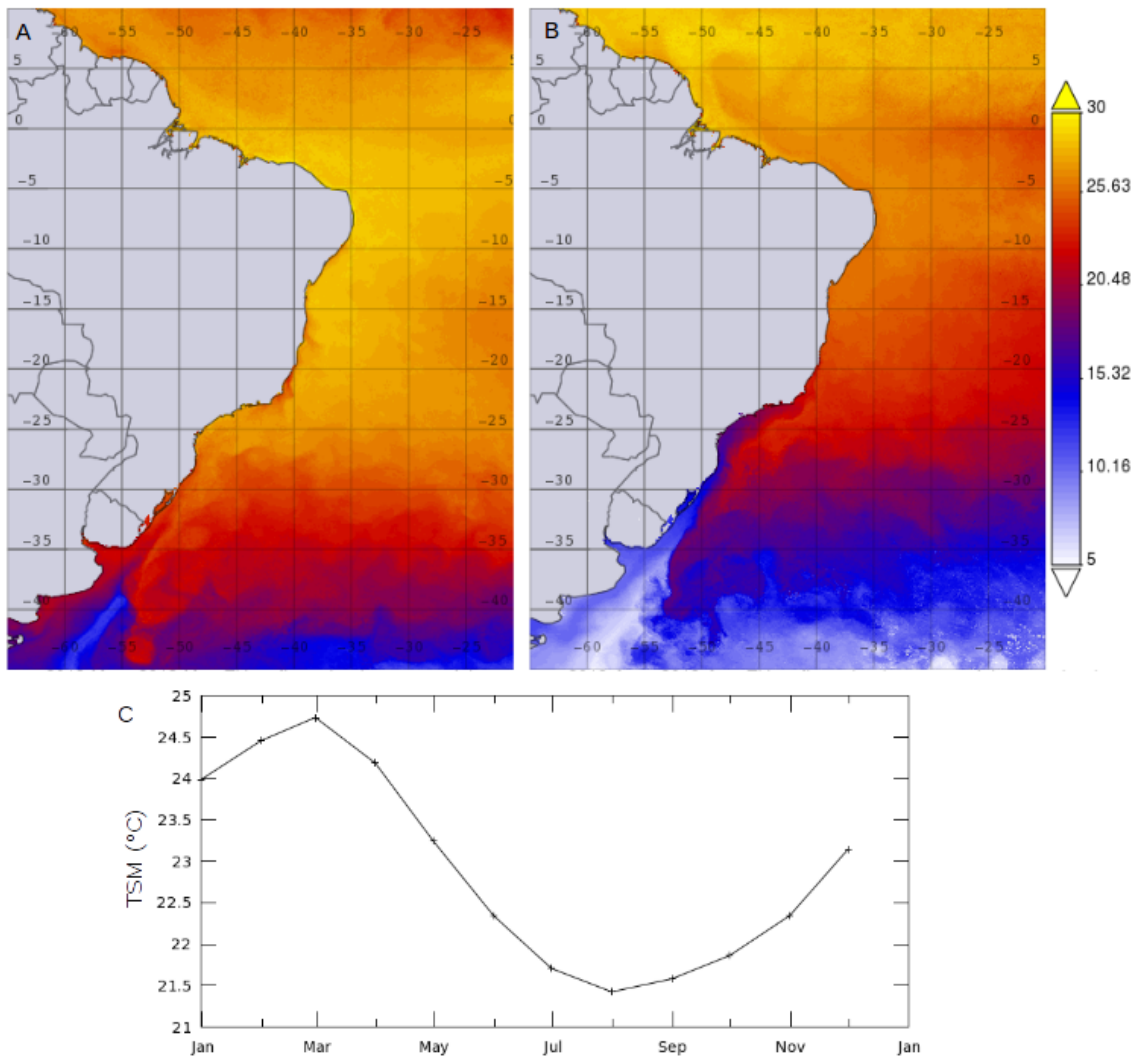
Figura 3.2 - Área de estudo, região da costa do Brasil e oceano adjacente a costa brasileira, de 65–20°O, e 10°N a 45°S.



Fonte: Produção da Autora.

A TSM possui uma variação sazonal na área de estudo com uma média mensal máxima no mês de março, sendo que as maiores temperaturas ( $\sim 25\text{-}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ficam na região tropical, ao norte de  $10^{\circ}\text{S}$  (Figura 3.3 a,c). A menor média mensal é no mês de agosto, com temperaturas mínimas da superfície do mar entre  $15$  e  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ao sul de  $35^{\circ}\text{S}$  (Figura 3.3 b, c).

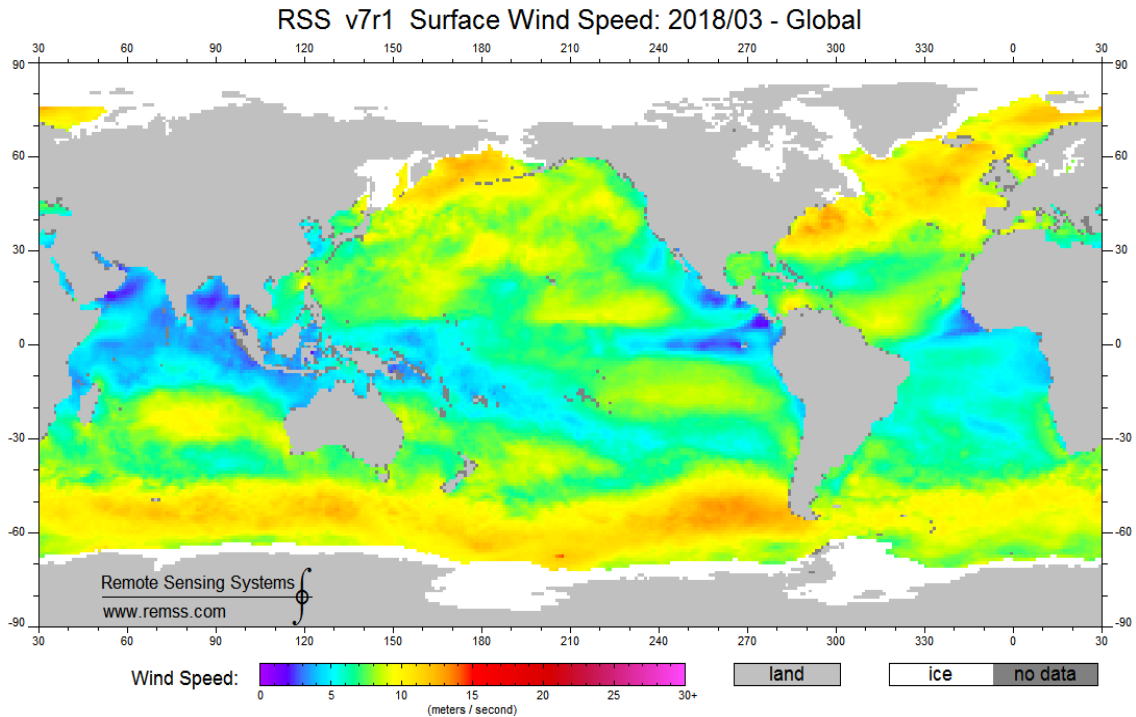
Figura 3.3 - Média mensal da TSM (em °C) na área de estudo: a) média para o mês de março; b) média para o mês de agosto; e c) média mensal para todo ano de 2018 obtidos com dados do sensor MODIS-Aqua.



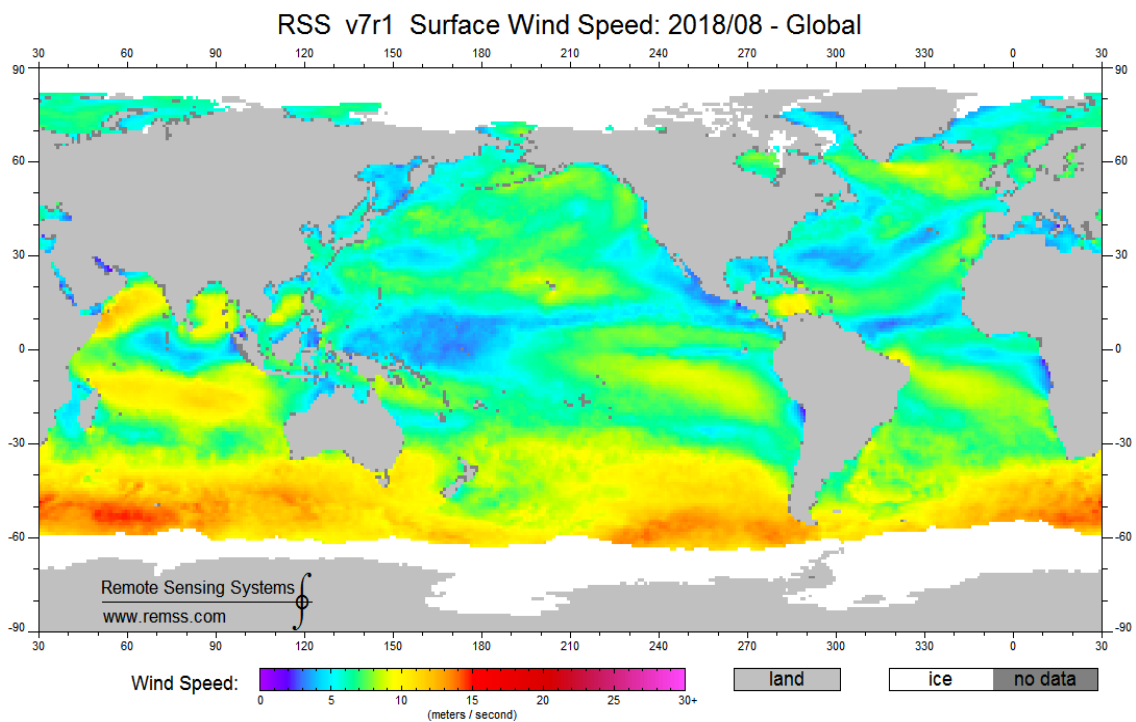
Fonte: National Aeronautics and Space Administration (2020a).

No verão os ventos alísios (de leste) são mais intensos no Atlântico Tropical-Norte ( $> 10$  m/s). No inverno os ventos são mais intensos em toda a bacia do Atlântico Sul ( $> 6$  m/s), principalmente abaixo de  $30^{\circ}\text{S}$  ( $>10$  m/s), onde atuam os ventos de oeste. Já no Atlântico Tropical Norte os ventos alísios ficam bem menos intensos ( $< 5$  m/s) no inverno austral (Figura 3.4). Na figura abaixo, foram selecionados as médias dos meses de março (final do verão) e agosto (final do inverno).

Figura 3.4 - Média mensal da intensidade do vento, utilizando dados de sensores de microondas (SSM/I, Windsat e AMSR2) produzidos pelo grupo *Remote Sensing System*: a) média mensal de março de 2018 e b) média mensal de agosto de 2018.



(a)



(b)

Fonte: Remote Sensing Systems (2020).

## 3.2 Materiais

Os tópicos a seguir referem-se à caracterização dos dados in situ e produtos de satélite que foram utilizados na pesquisa.

### 3.2.1 In situ

O *Global Ocean Observing System* do Brasil (GOOS-BRASIL; [www.goosbrasil.org](http://www.goosbrasil.org)) integra um sistema nacional de observação dos equipamentos in situ no oceano, que visa melhoria na previsão climática, índices de precipitação, monitoramento do nível do mar, obtenção de dados oceanográficos entre outros. Dentro desse sistema, dois programas se destacam para uso neste trabalho: o *Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic* (PIRATA) e Programa Nacional de Boias (PNBoias).

#### 3.2.1.1 Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic (PIRATA)

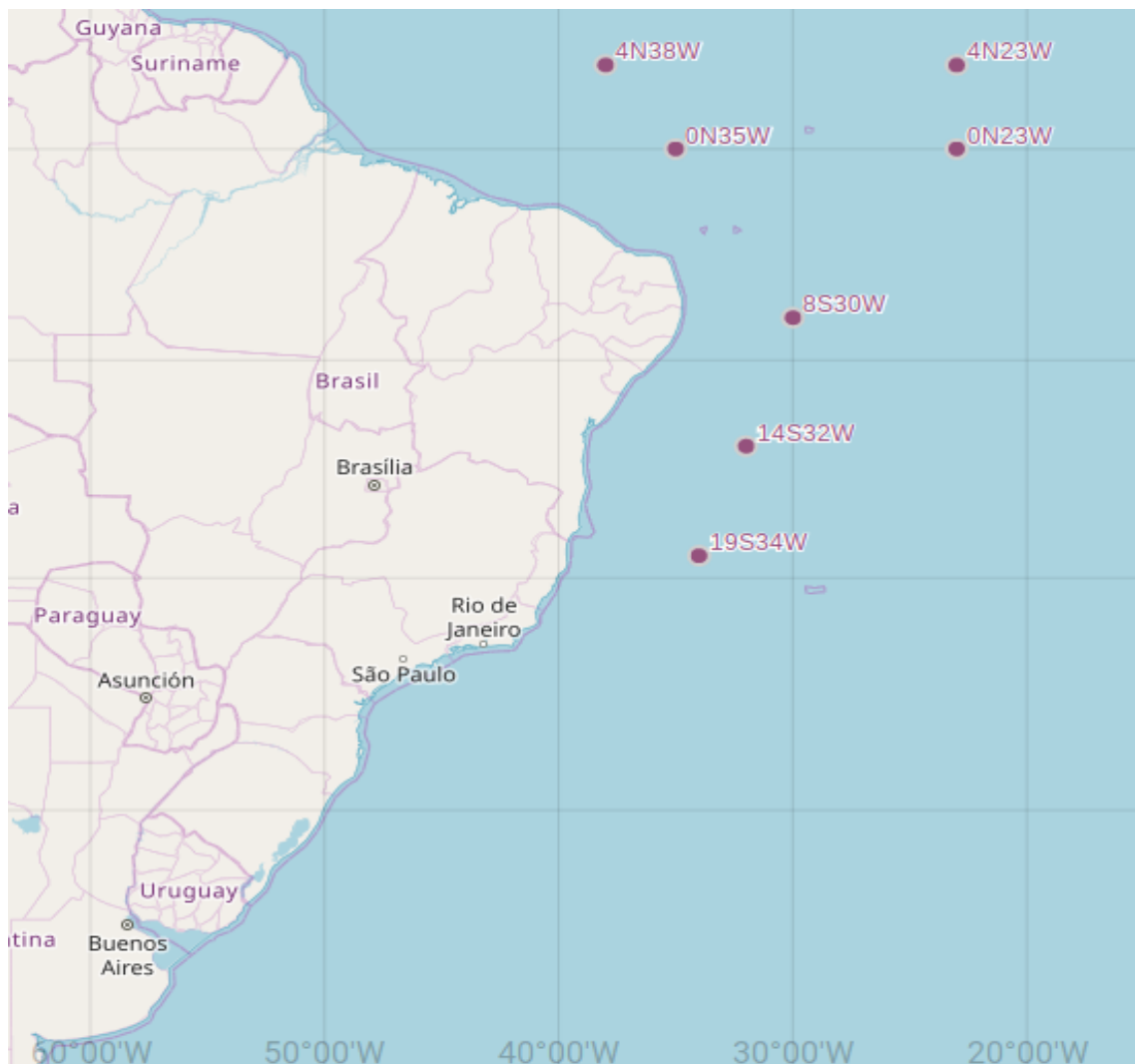
*Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic* (PIRATA) é um programa de observações in situ por meio de boias fixas no oceano Atlântico Tropical fundado em meados da década de 1990 (Figura 3.5). O PIRATA foi desenvolvido similarmente ao programa *Tropical Atmosphere-Ocean* (TAO), usado para estudar a variabilidade do *El Niño Southern Oscillation* (ENSO) no Pacífico equatorial (INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT, ; NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, ).

O programa é uma parceria entre o Brasil, França e Estados Unidos, com a finalidade de estudar as interações oceano-atmosfera no Atlântico Tropical que afetam a variabilidade climática. Entre suas medidas de variáveis está a TSM (temperatura de sub-superfície), com 14 níveis coleta de temperatura e profundidades máxima de até 500 m. Seus dados são coletados e armazenados em intervalos de 10 minutos, com disponibilidade pública por médias diárias transmitidas diariamente para o sistema de satélite Argos e transmitido pelo GTS.

Originalmente, as 21 boias utilizadas pelo PIRATA eram *Autonomous Temperature Line Acquisition System* (ATLAS), com acurácia de TSM de 0,03°C. Mas desde 2015, as boias estão sendo trocadas gradativamente pelas T-FLEX, que foram testadas no PIRATA-US - parte do programa em que os EUA tem comprometimento, ao norte do equador (SERVAIN et al., 1998; INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT, ). Essas boias contam com mais sensores, tanto para coletas de

parâmetro oceanográfico, como atmosférico; tempo de vida de 18 meses - ao contrário do ATLAS, que o tempo de vida é de 12 meses - e dados horários, diferente dos diários que eram fornecidos até então (INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT, ). Até o momento, as boias de responsabilidade do Brasil ainda utilizam o sistema ATLAS.

Figura 3.5 - Boias utilizadas do PIRATA na pesquisa, sinalizadas em roxo, com suas devidas coordenadas.



Fonte: Adaptada de Global Ocean Observing System do Brasil (2019a).

### 3.2.1.2 Programa Nacional de Boias (PNBoia)

Como complemento ao PIRATA, o Brasil implementou uma rede de boias meteoceanográficas para contribuir com o GOOS-BRASIL, entre elas, o Programa Nacional de Boias (PNBoia) (SERVAIN et al., 1998; MARINHA DO BRASIL, ). PNBoia é um programa nacional que tem como objetivo disponibilizar dados meteorológicos e oceanográficos na região do Oceano Atlântico Sul e Tropical, inicialmente coordenado pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), e posteriormente pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), desde dezembro de 1999 (MARINHA DO BRASIL, ), sanando a carência de dados da região, do qual ainda é precária, com 21 boias fixas e 297 boias de deriva (muitas destas já desativadas ou em manutenção) (Figura 3.6). O PNBoia inclui derivadores de baixo custo lançados no Atlântico Sul assim como boias ATLAS próximo à costa. Seus dados são recebidos pelo sistema de satélite Argos, e para o Brasil são transmitidos diretamente através dos satélites SCD 1 e 2 e CBERS, do qual são disponibilizados para o CHM, via FTP, pela Divisão de Satélites Ambientais (DSA) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE.

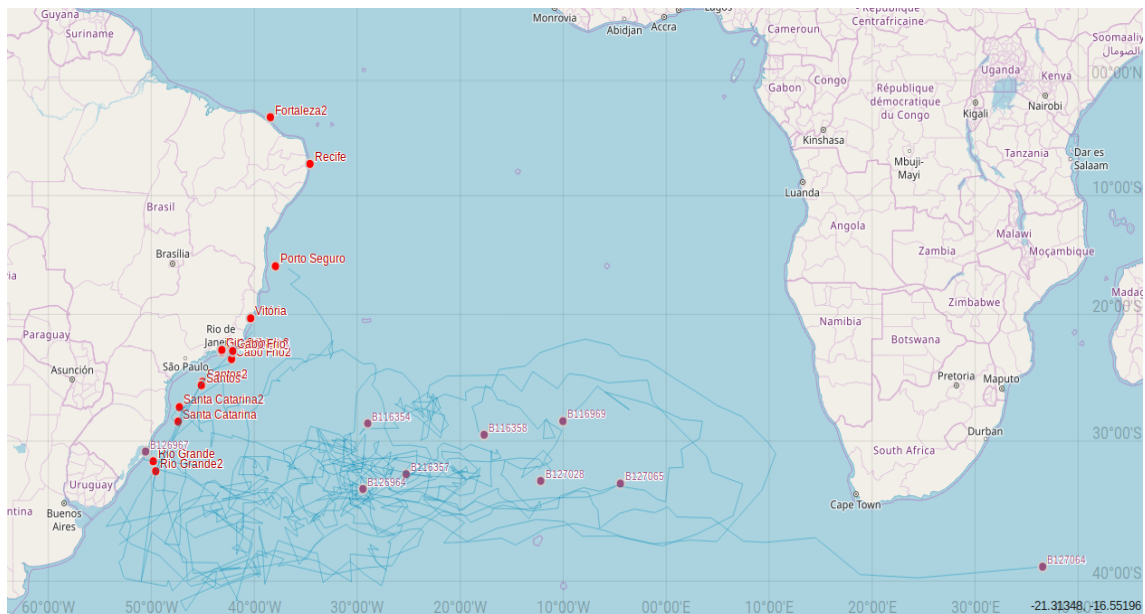
Deve-se considerar que a perda total ou de algum sensor/equipamento que ocorrem nas boias (tanto para o PIRATA como PNBoia), seja por falha mecânica ou vandalismo associado à pesca, requer muito tempo e dinheiro para serem repostas (MARINHA DO BRASIL, 2018; SERVAIN et al., 1998).

O uso de derivadores para a comparação de estimativas de TSM por satélite é uma prática comum, pois seus termistores conseguem medir temperaturas de  $-5$  a  $45^{\circ}\text{C}$  com alta acurácia, tendo uma deriva estimada de apenas  $-0,10^{\circ}\text{C}/\text{ano}$ , sendo esta sua vida útil (REVERDIN et al., 2010). No caso, das boias do programa PIRATA há uma manutenção regular programada uma vez ao ano para garantir a boa qualidade dos dados. Já para as boias fixas do programa PNBoia o controle de qualidade pode ficar comprometido para boias de mais difícil acesso e sem revisitas frequentes. Para garantir o uso adequado de dados in situ de alta qualidade na comparação com os dados de TSM de satélite, e evitar o uso de dados espúrios como verdade de campo, foi feito um controle de qualidade dos dados que será detalhado mais adiante (3.3.1). Um resumo dos programas PIRATA e PNBoia pode ser observado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Resumo dos programas PIRATA e PNBoia

	PIRATA	PNBoia
Nome Completo	Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic	Programa Nacional de Boias
Resolução Temporal	24 horas (média diária)	1 hora
Tipo de Boia	Boias fixas	Boias fixas e de deriva
Quantidade de Boias Utilizadas	7 boias fixas	9 boias de deriva e 5 boias fixas
Localização das Boias	Oceano Atlântico Tropical	Costa brasileira (fixas) e Oceano Atlântico Sul (deriva)
Grande Quantidade de Dados de Vento Disponível	Sim	Não

Figura 3.6 - Boias utilizadas do PNBoia na pesquisa. Sinalizado em vermelho estão as boias fixas na costa brasileira. Marcado em roxo são as boias de deriva.

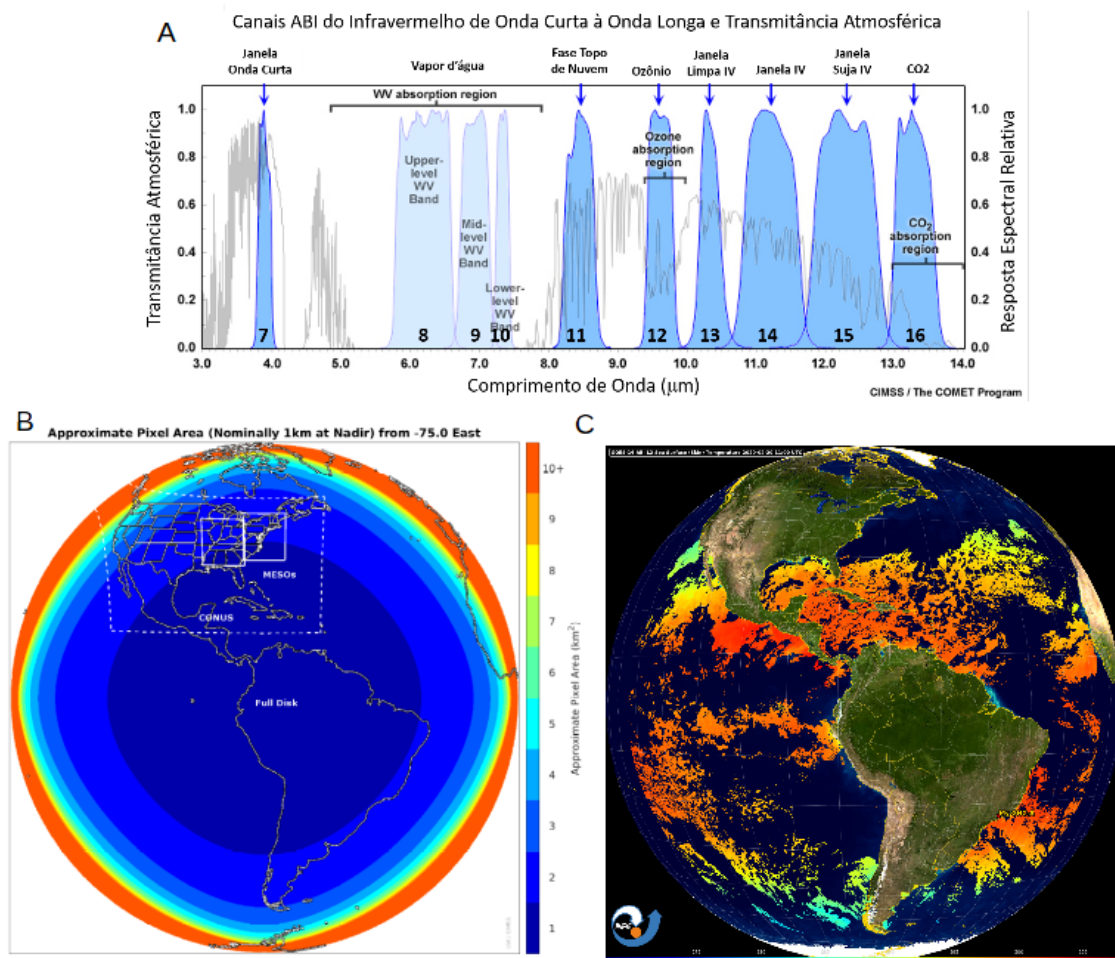


Fonte: Adaptada de Global Ocean Observing System do Brasil (2019b).

### 3.2.2 TSM ABI-GOES-16

O GOES-16, posicionado no setor LESTE (75,2°O), possui a bordo o sensor *Advanced Baseline Imager* (ABI), com campo de visada centrado sobre a região Leste das Américas (60°N, 60°S, 135°O e 15°O). O sensor ABI possui 16 canais espectrais, sendo 10 no infravermelho termal, e realiza o imageamento do globo inteiro (*Full Disk*), a cada 15 minutos, o que permite a composição de imagens a cada 1 h para a geração do produto L2 e L3 de TSM (Figura 3.7).

Figura 3.7 - a) Canais ABI do infravermelho termal com função resposta do sensor, e a transmitância atmosférica para uma atmosfera padrão (exemplificada); b) Campo de visada do sensor ABI indicando a degradação da resolução espacial com aumento do ângulo de visada e os modos de imageamento; c) Imagem de TSM ABI L2 na projeção de satélite (composição horária com 2 km, NOAA).



Fonte: a) COMET, b) National Aeronautics and Space Administration (2019) e c) DSA/INPE.



O produto *GHRSSST Level 3C sub-skin Sea Surface Temperature from the Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES 16) Advanced Baseline Imager (ABI) in East position (GDS V2)* (nome curto de GOES16-OSISAF-L3C-v1.0), produzido pela *Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility (OSI SAF)*, é um produto L3 de média horária projetada em grade regular com 0,05 graus de resolução ( $\sim 6$  km). O sensor ABI a bordo da plataforma do GOES-16 permite cálculos de TSM diurnos, sendo que na geração antecessora do *Imager* a TSM derivada estava restrita somente a condições noturnas devido ao número reduzido de canais. A TSM estimada pelo grupo da OSI SAF é derivada do mesmo algoritmo de regressão com três canais (*split window*) que já vem sendo aplicado ao sensor SEVERI do satélite geostacionário europeu *Meteosat Second Generation (MSG)* (com os canais centrados em 8,5; 10,3 e 12,3  $\mu\text{m}$ ) (EUMETSAT/OSI SAF, 2018). O canal em 8,5  $\mu\text{m}$  é usado em conjunto com os de 10,3  $\mu\text{m}$  e 12,3  $\mu\text{m}$  para melhor detecção de nuvens cirrus finas, bem como para melhor correção da absorção do vapor d'água, já que cada canal possui diferentes graus de influência de absorção dos gases (Figura 3.7) (EUMETSAT OSI SAF MANUAL, 2018; IGNATOV, 2010). Para simplificar a nomenclatura, esse produto será referido como ABI-GOES-16 deste ponto em diante.

Vale mencionar que o produto TSM ABI-GOES-16 do grupo NOAA STAR não foi avaliado em conjunto com o produto OSI SAF, porque ainda não estava operacional no início do desenvolvimento do presente trabalho. Mas uma breve análise comparativa deste produto foi adicionada ao final do trabalho no estudo de caso.

### 3.2.2.1 Processamento

O processamento em cadeia da estimativa de TSM para este produto L3 consiste nas seguintes etapas (EUMETSAT OSI SAF MANUAL, 2018):

- Pré-processamento;
- Controle de máscara de nuvem;
- Cálculos de TSM com aplicação do modelo de regressão;
- Determinação do valor de confiança de proximidade; e
- Determinação do nível de qualidade.

**Pré-processamento:** Nesta etapa são usados como entrada os dados de TB (L1) de cada canal em escala temporal e espacial originais, e é aplicada a máscara de nuvens *Nowcasting SAF cloud mask*, do qual será detalhado a seguir.

**Controle de máscara de nuvem:** A máscara de nuvem *Nowcasting SAF* é controlada por uma série de testes que foram definidos para considerar várias grandezas. Para cada teste, um indicador de teste é definido por comparação da quantidade obtida ( $valor_{teste}$ ), um valor limite ( $valor_{limite}$ ) e um valor crítico ( $valor_{critico}$ ). Se o  $valor_{teste}$  estiver abaixo do  $valor_{limite}$ , não há problemas, e se estiver acima do  $valor_{critico}$ , o risco de erro é elevado e o pixel é rejeitado (ou melhor, mascarado). O indicador de teste é definido como:

$$indicador_{teste} = 100 \frac{valor_{teste} - valor_{limite}}{valor_{critico} - valor_{limite}} \quad (3.1)$$

O resultado pode ser indicado pela escala a seguir (EUMETSAT OSI SAF MANUAL, 2018):

- 0: sem problema;
- Entre 0 e 100 (excluindo extremos): problema potencial; e
- 100: problema crítico.

Entre seus indicadores, estão: indicador de máscara de nuvem primária, indicador de gradiente (baseado esquematicamente no valor local do gradiente de TSM), indicador de variabilidade de tempo, indicador de aerossol estratosférico, indicador de poeira do Saara, indicador de valor de temperatura local e indicador de gelo.

**Cálculos de TSM:** o cálculo de TSM é feito em duas etapas - primeiro no contexto de controle de máscara de nuvem (usando os valores de cada pixel) e depois com um cálculo final usando um termo de correção atmosférica suavizado sobre dados confiáveis.

O algoritmo de TSM operacional utilizado em condições diurnas e noturnas para o ABI-GOES-16 é o algoritmo de diferença multicanal não linear (*Non-linear Multi-channel Difference*):

$$TSM = (a + bS\Theta)T_{8.5} + (c + dT_{climatológico} + eS\Theta)(T_{10.3} - T_{12.3}) + gS\Theta + f \quad (3.2)$$

Onde  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$   $f$  e  $g$  são os coeficientes da análise de regressão determinados a partir de TBs simuladas com um banco de dados de perfis de radiossonda (FRANÇOIS et al., 2002), e um coeficiente de correção de *offset* em relação às medidas in situ de

TSM de boias. T<sub>8,5</sub>, T<sub>10,3</sub> e T<sub>12,3</sub> são os TBs em 8,5; 10,3 e 12,3  $\mu\text{m}$ , respectivamente.  $T_{climatológica}$  é um valor TSM climatológica e

$$S\Theta = \sec(\Theta_{sat}) - 1 \quad (3.3)$$

onde  $\Theta_{sat}$  é o ângulo zenital do satélite.

O período diurno é definido pelo ângulo zenital no intervalo de 0 a 90 graus e o noturno no intervalo de 110 a 180 graus. No crepúsculo (ângulo zenital de 90 a 110 graus), a TSM é calculada por uma média ponderada dos algoritmos do período diurno e noturno.

Vieses regionais e sazonais tem sido detectados nos campos de TSM estimados a partir do sensor SEVIRI-MSG, causados devido a limitações do algoritmo não linear. Para corrigir esse viés, foi adotada uma abordagem empírica, tanto no algoritmo de TSM do SEVIRI como do ABI, baseada na média das diferenças entre as TBs simuladas e observadas ao longo de 20 dias anteriores ao dia de processamento. As TBs simuladas são determinadas a partir de perfis atmosféricos do modelo ECMWF e o produto de TSM L4 OSTIA, como entrada em um modelo de transferência radiativa (RTTOV-9). A suavização das diferenças entre a TB simulada e observada usando a média de 20 dias é realizada para minimizar as incertezas na TB simulada decorrentes dos modelos (BORGNE et al., 2011; BORGNE et al., 2012).

**Determinação do nível de qualidade:** Finalmente, é realizada a determinação do nível de qualidade das estimativas em cada pixel, estipulada para todos produtos L3 segundo recomendações da GHRSSST SCIENCE TEAM (2011), EUMETSAT OSI SAF MANUAL (2018), Picart e Marsouin (2018), onde são definidos 6 níveis (de 0 a 5) com confiabilidade crescente:

- 0: não processado;
- 1: nublado e que não deve ser utilizado em nenhuma situação;
- 2: ruim; e
- 3–5: recomendado.

Estes níveis de qualidade são definidos a partir dos indicadores da máscara de nuvens, da correção do algoritmo, e um indicador do angulo zenital de visada do sensor. O documento técnico do produto ABI-GOES-16 L3 OSI SAF (EUMETSAT OSI SAF

MANUAL, 2018) recomenda que os usuários usem os níveis de qualidade de 3 a 5 para aplicações quantitativas. Os níveis de qualidade são dedicados a fornecer ao usuário um meio simples de controle de qualidade.

Vale lembrar que este é um produto de TSM representativo da profundidade de sub-pele ( $\sim 1$  mm), já que as variações da TB observadas pelo sensor são sensíveis à TSM pele ( $\sim 10 \mu\text{m}$ ), mas o algoritmo de regressão é calibrado para ser representativo da TSM in situ ( $\sim 0,5\text{--}1$  m). Sendo assim, o produto é denominada de sub-pele por ser sensível à variações da TSM pele mas representar na média variações da TSM in situ (PETRENKO et al., 2019).

### 3.2.3 TSM padrão L4

Entre os produtos de nível de processamento L4 selecionados estão o NOAA *Geopolar Blended L4 foundation SST*, gerado pela NOAA, e o *Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis* (OSTIA) desenvolvido pelo UK-Met-Office. Como já mencionado, os produtos L4 permitem obter um mapa homogêneo, diário, contínuo e de alta qualidade para o uso em modelos de PNT e oceânicos, sendo que ambos produtos são bem conceituados e altamente utilizados na PNT (DONLON et al., 2012; GHRSSST SCIENCE TEAM, 2011).

Ambos os produtos são representativos das profundidade de fundação (do inglês, *foundation*) ( $\sim 10$  m) que não sofre influência da estratificação termal diurna, pois são gerados a partir de dados de TSM noturnos e/ou com dados diurnos com vento acima de 6 m/s.

#### 3.2.3.1 OSTIA - Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis

O *Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis* (OSTIA) (nome curto de OSTIA-UKMO-L4-GLOB-v2.0), desenvolvido como uma contribuição do Instituto de Meteorologia do Reino Unido (UK Met-Office) no esforço internacional do GHRSSST, é um dos produtos globais de TSM mais usados para a PNT e análise e monitoramento de sistemas oceano-atmosfera. A análise de TSM é produzida diariamente com base operacional no UK-Met-Office usando interpolação ótima (OI) em uma grade global de 0,054 graus de resolução (grade). Os sensores usados para compor o produto final são o *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR-NOAA e MetOP), *Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager* (SEVIRI-MSG), *Advanced Baseline Imager* (GOES-16), *Infrared Atmospheric Sounding Interferome-*

ter (IASI), *Tropical Rainfall Measuring Mission Microwave Imager* (TMI) e dados in situ de navios e boias (ancoradas e flutuantes) (UK MET OFFICE, 2012).

A cobertura do gelo marinho usado como entrada no produto de TSM é retirado diariamente da análise mais recente obtida dos dados do OSI SAF com 10 km de resolução e processada para garantir uma máscara terrestre dos dados consistente com a usada no OSTIA. Os dados são então interpolados bi-linearmente para a grade do OSTIA para fornecer o campo final do gelo marinho, apresentado nos arquivos de saída.

O controle de qualidade dos dados do OSTIA faz algumas rejeições para obter uma melhor representação de TSM<sub>md</sub>. Observações quando o sol está acima do horizonte (período diurno) e a velocidade de vento menor que 6 m/s são rejeitadas, para impedir a inclusão de medidas diurnas com estratificação termal entre a profundidade de pele e sub-pele e a profundidade de fundação à  $\sim 10$  m. Dados de TSM por satélite que medem TSM<sub>pele</sub> incluídos na análise são ajustados para compensar o viés de temperatura de pele para velocidade do vento acima de 6 m/s, adicionando 0,17 K à medição de TSM (DONLON et al., 2012). O controle de qualidade também conta com um algoritmo que faz a verificação de *background* em relação à análise anterior de TSM, usando como base estimativas a priori dos erros do *background* e dos erros das observações. Este esquema estima a probabilidade de erro grosseiro, do qual normalmente rejeita cerca de 0,5% das observações de TSM de satélite e nas medições in situ de boias ancoradas, flutuantes e navios, são rejeitados cerca de 35%, 10% e 45% dos dados de TSM, respectivamente.

A seguir, serão apresentadas descrições breves dos sensores usados como entrada para compor o produto final (DONLON et al., 2012):

- **Advanced Very High Resolution Radiometer - (AVHRR):** AVHRR-3 é um radiômetro de varredura com seis canais - três canais na região do visível ao IR próximo e três no IR termal - e opera nas plataformas do satélite *Meteorological Operational Satellite - A* (MetOp-A) e *National Oceanic and Atmospheric Administration - 20* (NOAA-20). A resolução espacial nominal no nadir é de 1,1 km. O AVHRR está a bordo de satélites polares operacionais desde 1978, sendo o sensor com maior série histórica de dados de TSM.

O OSTIA utiliza diversos produtos AVHRR do formato GHRSSST L2P, incluindo dados de 1–2 km de *Local Area Coverage* (LAC) fornecidos pela

EUMETSAT, e de *Global Area Coverage* (GAC) com 9 km de dados fornecidos pelo *US Naval Oceanographic Office* (NAVOCEANO). A longa série histórica de dados AVHRR e seu uso em programas operacionais tornam esses dados uma base importante para o sistema de análise OSTIA, tanto em tempo quase real quanto em atividades de reanálise.

- **Meteosat Second Generation Spinning Enhanced Visible And Infrared Radiometer (SEVIRI):** O SEVIRI é um radiômetro de imagens que opera na plataforma do satélite *Meteosat Second Generation 1* (MSG). O SEVIRI utiliza canais IR de 11 e 12  $\mu\text{m}$  para recuperação de TSM com um campo de visada instantâneo do sensor no ponto mais central (ao nadir) de  $\sim 3$  km. Imagens são adquiridas a cada 15 min e são utilizadas pelo EUMETSAT OSI SAF na geração de produtos de TSM, utilizando algoritmo de regressão não-linear multicanal (*Nonlinear Multichannel SST*) (DONLON et al., 2012).

A principal vantagem do uso de dados geoestacionários no OSTIA é a maior frequência de dados (15 min), permitindo aumentar a cobertura espacial diária do campo de TSM, já que as nuvens tendem a se mover rapidamente, com exceção apenas para regiões onde atuam sistemas persistentes (e.g., na Zona de Convergência Intertropical).

- **In situ:** Os dados de TSM in situ medidos a partir de navios e boias para a geração dos produtos OSTIA são obtidos por meio do sistema GTS, acessíveis a cada dia em NRT.
- **Microwave Imager (TMI) - Tropical Rainfall Mapping Mission (TRMM):** O TMI é um radiômetro de microondas passivo com canais em cinco frequências separadas: 10,7; 19,4; 21,3; 37 e 85,5 GHz, sendo que o canal 10,7 GHz era utilizado para as estimativas de TSM. A plataforma foi lançada em 1997 e operou até o início de 2015. Os dados do TMI possuem 25 km de resolução com cobertura entre 40° N e 40° S. Sua órbita terrestre é baixa, com uma altitude de 350 km e uma inclinação de 35° em relação ao equador, otimizada para estimativas de precipitação tropical.

Como dados de TSM na região tropical são escassos com o IR (devido à persistência de nuvens e convecções atmosféricas), os dados de MW são fundamentais para a análise OSTIA, ainda que a resolução de grade seja mais degradada (CHELTON; WENTZ, 2005).

### 3.2.3.2 GHRSSST Level 4 OSPO Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis (GDS version 2)

O produto *GHRSSST Level 4 OSPO Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis (GDS version 2)* (Geo-Polar-Blended-OSPO-L4-GLOB-v1.0), desenvolvido pelo *Office of Satellite and Product Operations* (OSPO) da NOAA, gera análises de TSM global diariamente em uma grade global de 0,054 grau, com interpolação ótima (IO), similarmente ao produto OSTIA apresentado anteriormente. Os sensores usados são o AVHRR, *Visible Infrared Imager Radiometer Suite* (VIIRS), *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES) imager, *Advanced Himawari Imagers* (AHI) e dados in situ de navios e boias (ancoradas e flutuantes) (OFFICE OF SATELLITE PRODUCTS AND OPERATIONS, 2015).

- **Visible Infrared Imager Radiometer Suite (VIIRS):** O *Visible Infrared Imager Radiometer Suite* (VIIRS) é um radiômetro com canais na região do visível ao IR. A bordo do satélite polar *Suomi National Polar-orbiting Partnership* (Suomi-NPP) desde 2011, o VIIRS conta com bandas centralizadas em 3,7; 11 e 12  $\mu\text{m}$ , respectivamente, para a determinação de TSM (PETRENKO et al., 2014). Este sensor também está presente nas plataformas do *Joint Polar Satellite System* (JPSS), promovendo continuidade ao programa de satélites polares operacionais da NOAA.
- **Advanced Himawari Imagers (AHI):** desenvolvido pelo *Japan Meteorological Agency*, está a bordo do satélite geostacionário Himawari. AHI conta com 16 canais (3 no visível, 3 no IR próximo e 10 no IR), com característica espectrais e espaciais bem semelhantes ao ABI. Sua resolução espacial é de 0,5 - 1 km no VIS e de 2 km no IR, e pode fornecer observações *Full Disk* a cada 10 minutos (JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY, 2015).

### 3.2.3.3 Geração dos produtos de TSM L4

Os produtos de análise de TSM L4 tanto do OSTIA como do Geo-Polar-Blended-OSPO são gerados de forma similar pela técnicas de interpolação ótima (espacial e temporal) que utilizam os dados de entrada (de satélite e in situ) e um campo de referência chamado de *background*.

O campo de referência é gerado a partir de análises anteriores, com um termo de relaxamento (do inglês *relaxation*) para a climatologia na ausência de novas medi-

ções. O *background*  $x_{i,k}^b$ , no ponto de grade  $i$  e tempo  $k$  é definido como (DONLON et al., 2012):

$$x_{i,k}^b = \lambda_{i,k}(x_{i,k-1}^a - x_{i,k-1}^c) + x_{i,k}^c \quad (3.4)$$

onde  $\lambda_{i,k}$  é um escalar menor que 1,  $x_{i,k-1}^a$  é a análise anterior, e  $x_{i,k}^c$  é uma referência climatológica para o dia  $k$ . Para cada ponto da grade e tempo de análise, uma escala de tempo de relaxamento (*relaxation time scale*) é derivada para determinar  $\lambda_{i,k}$ , em função da disponibilidade de dados (e.g., em regiões polares com cobertura de gelo marinho a escala de relaxamento temporal pode chegar a 30 dias).

A análise de TSM que vai gerar o produto final usa então o campo de *background* calculado pela Equação 3.4 e os dados de entrada obtidos pelos diversos sensores e medições in situ, devidamente corrigidos (com as correções de viés), em um esquema de interpolação ótima em escala múltipla. A equação OI é dada por:

$$x_k^a = x_k^b + BH_k^T [H_k BH_k^T + R_k]^{-1} (y_k - H_k x_k^b) \quad (3.5)$$

onde  $x_k$  é um vetor contendo todos os valores de  $x_{i,k}$ ;  $i = 1, \dots, n$  na grade de análise no tempo  $k$ ;  $y_k$  um vetor contendo as observações;  $B$  é a matriz de covariância de erro do *background*;  $R_k$  é matriz de covariância de erro de observação; e  $H_k$  é o operador de observação que faz a interpolação da grade do modelo para os locais de observação. Essa equação, no OSTIA, é resolvida usando métodos de Correção de Análise (*Analysis Correction method*), por ser mais eficiente e flexível ao processar grande número de observações.

Para finalizar a sessão de materiais, a Tabela 3.2 apresenta um resumo dos produtos L3 e L4 que serão utilizados no presente trabalho.



Tabela 3.2 - Resumo dos produtos L3 e L4

	ABI-GOES-16	OSTIA	Geo-Polar-Blended
Nome completo	GHRSSST Level 3C sub-skin Sea Surface Temperature from the Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES 16) Advanced Baseline Imager (ABI) in East position (GDS V2)	Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis	GHRSSST Level 4 OSPO Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis (GDS version 2)
Nome curto	GOES16-OSISAF-L3C-v1.0	OSTIA-UKMO-L4-GLOB-v2.0	Geo-Polar-Blended-OSPO-L4-GLOB-v1.0
Resolução Temporal	1 hora	24 horas	24 horas
Região	América (60° N - 60° S e 135° O - 15° O)	Global	Global
Intervalo	14 de Dezembro de 2017 - Presente	25 de Abril de 2013 - Presente	02 de Junho de 2014 - Presente
Sensores	ABI	AVHRR, SEVIRI, IASI, TMI e ABI	AVHRR, VIIRS, ABI e AHI
Profundidade Representativa do Produto	~ 1 mm	~ 10 m	~ 10 m

### 3.3 Metodologia

Como apresentado anteriormente, o trabalho foi dividido em duas etapas principais: a primeira é a comparação da TSM ABI-GOES-16 com dados in situ de boias fixas e de deriva para a verificação da qualidade do produto de satélite na região de estudo; a segunda etapa é a comparação da média diária da TSM ABI-GOES-16 com os produtos globais L4, a fim de identificar possíveis diferenças, tanto devido às incertezas no produto L3 como a sub-representatividade de processos de mesoescala no produto L4. Para ambas as comparações foram utilizados dados de janeiro a dezembro de 2018, a fim de englobar um ano completo de observações.

#### 3.3.1 TSM ABI-GOES-16 vs. in situ

O produto ABI-GOES-16 OSI SAF L3C v1.0 foi comparado com dados in situ da rede PIRATA e o PNBoia, obtidos no período de 2018.

Aplicamos aos dados in situ um controle de qualidade. O objetivo foi identificar erros espúrios, na forma de dados anômalos, pelo método estatístico de Amplitude Interquartil (IQR - do inglês *Interquartil Range*) (LIMA, 2016). O método IQR é um importante indicador de variabilidade de um conjunto, empregado para identificar erros espúrios (*outlier*). Inicialmente, utiliza-se o método de Quartis – do qual divide o conjunto em quatro partes – definindo três valores:  $Q_1$ ,  $Q_2$  e  $Q_3$  (Equação 3.6). Em seguida, calcula-se o IQR (Equação 3.7) e determina-se os limites inferiores e superiores (Equação 3.8), que finalmente é utilizado para identificar dados *outlier*. O índice  $n$  representa a quantidade de quartis, de 1 a 3;  $f_{Kn}$  corresponde aos valores fixos de 0,25 e 0,75 para o cálculo de  $Q_1$  e  $Q_3$ , respectivamente;  $i$  é o valor antes e depois do quartil: por exemplo, o  $Q_1$  tem 4 números antes e depois da sua divisa, então  $i = i_4$  e  $i + 1 = i_5$ ; e  $V_i$  representa o valor na posição  $i$ .

$$Q_n = V_i + f_{Kn}(V_{i+1} - V_i) \quad (3.6)$$

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (3.7)$$

$$L_{sup} = Q_3 + 1,5.IQR \quad e \quad L_{inf} = Q_1 - 1,5.IQR \quad (3.8)$$

Entretanto, esse controle de qualidade descrito acima mostrou-se insuficiente em eliminar dados espúrios (*outlier*), principalmente para o programa PNBoia fixa. O que conseguiu-se perceber com o método IQR para os programas PIRATA e PNBoia de deriva é que a diferença entre TSM satélite e in situ ( $\Delta TSM = TSM_{sat} - TSM_{insitu}$ )

não foi maior que  $\pm 3$  °C. Portanto, em todos os programas de boias, foi estipulado o limiar empírico de  $\pm 3$  °C. Para as diferenças entre TSM satélite e in situ maior que este limiar, os *match-up* foram descartados das análises estatística.

Após esse controle de qualidade, as comparações do programa PNBoia com o ABI-GOES-16 são feitas por médias horárias, pois ambas são disponibilizadas com essa resolução temporal. Já na comparação entre PIRATA e ABI-GOES-16, as comparações foram feitas por médias diárias. O PIRATA disponibiliza seus dados nessa resolução temporal, enquanto os dados ABI-GOES-16 são por médias horárias. Portanto, foram realizadas médias diárias do ABI-GOES-16, facilitante a comparação entre o programa PIRATA e ABI-GOES-16. Deve ser destacado que, por mais que os dados do PNBoia sejam disponibilizados em intervalos de hora em hora, suas coletas são aleatórias, portanto, com diversos horários faltando.

Os dados de vento do PNBoia são escassos e até mesmo inexistentes, para algumas boias, portanto essa variável foi utilizada apenas para o PIRATA, empregado na identificação e eliminação de medidas de TSM (média diária) com vento menor que 6 m/s. No caso do conjunto de dados PNBoia, para separar os dados com e sem estratificação termal foi feita uma separação entre os dados diurnos e noturnos. E no caso do conjunto PIRATA a separação foi feita com base nos dados de vento, avaliando também a influência da estratificação termal (diurna) na comparação entre a TSM in situ e de satélite do sensor ABI. Assim, quatro grupos de análise após o controle de qualidade dos dados *outlier* foram gerados (Tabela 3.3): (i) dados noturnos do PNBoia; (ii) dados diurnos do PNBoia; (iii) todos os dados diários (média) do PIRATA; e (iv) dados com intensidade do vento  $\geq 6$  m/s do PIRATA.

Tabela 3.3 - Resumo da divisão dos conjuntos de dados do PIRATA e PNBoia.

PNBoia (fixa e deriva) PIRATA (fixa)	<b>Com Estratificação</b>	<b>Sem Estratificação</b>
		Diurnos horários Todas médias diárias

Como já explicado (subcapítulo 2.1), TSM<sub>pele</sub>, TSM<sub>sub-pele</sub> e TSM in situ ( $\sim 0,2-1$ m) são sensíveis ao aquecimento diurno. Como as medidas realizadas in situ, no caso, TSM<sub>balde</sub>, são utilizadas na "validação" das medidas de satélite de TSM<sub>pele</sub> e TSM<sub>sub-pele</sub> (Eq. 2.2), critérios como utilizar dados noturnos ou diurno com vento  $\geq 6$  m/s são impostos, pois são capazes de quebrar a estratificação termal da coluna

d'água (DONLON et al., 2002; DONLON et al., 2012)..

Em relação aos dados de satélite do sensor ABI, para a comparação com os dados in situ foram utilizados os pixels com níveis de qualidade recomendados pelo manual do produto de TSM [EUMETSAT OSI SAF MANUAL \(2018\)](#) (3–5). Mas foram feitas também comparações separadas para os níveis 3, 4 e 5, afim de avaliar o ganho em acurácia do produto para cada nível recomendado.

Para diminuir possíveis erros de georreferenciamento, ausência de dados por bloqueio de nuvens, bem como a interferência de dados espúrios por contaminação de nuvens semi transparente, na comparação entre os dados in situ e de satélite foi utilizada uma janela de pixel centrada na posição geográfica dos dados in situ. Desse modo, para cada valor de TSM in situ, através da sua informação de latitude e longitude, é procurado o ponto central do pixel mais próximo dessas coordenadas. Caso esse ponto central do pixel tenha NQ entre 3–5, esse dado é selecionado para a análise. Entretanto, utilizar apenas o dado pontual (ponto mais próximo da localização da boia), pode ocasionar um decaimento muito grande de dados ou interferências indesejáveis como as citadas previamente. Portanto, foram gerados dois grupos de dados:

a) Dado pontual

- (i) dados noturnos do PNBoia
- (ii) dados diurnos do PNBoia
- (iii) todos os dados diários (média) do PIRATA
- (iv) dados com intensidade do vento  $\geq 6$  m/s do PIRATA

b) Janela de 5x5 pixel

- (i) dados noturnos do PNBoia
- (ii) dados diurnos do PNBoia
- (iii) todos os dados diários (média) do PIRATA

O item (iv) é analisado apenas para dados pontuais.

No grupo de janela de 5x5 pixel, a busca por pixel não mascarado se deu da seguinte forma: primeiramente, procurando o ponto central do pixel mais próxima à boia. Caso esse pixel tivesse NQ de 3–5, este seria usado para a comparação, caso contrário,

o segundo pixel mais próximo com NQ 3–5 seria selecionado. Caso ainda não tivesse encontrado dado com a qualidade requisitada, o algoritmo de busca continuaria procurando entre os pixels até encontrar ou finalizar a procura numa janela de 5x5. Se não encontrar nenhum pixel com NQ de 3–5 nesta janela, nenhuma informação era registrada.

Para averiguar o comportamento dos resultados extraídos dos grupos já citados – com o dado pontual e usando a janela de 5x5 pixel dos grupos (i) a (iv) –, foi implementada a estatística de análise de incertezas com os seguintes parâmetros de análise: erro médio quadrático (Equação 3.9), desvio padrão (Equação 3.10), erro absoluto (Equação 3.11) e viés (desvio médio) (Equação 3.12) (MONTGOMERY; PECK, 1992; PORTAL ACTION, b) a fim de verificar erros sistemáticos e aleatórios entre a TSMsat e TSM<sub>in situ</sub>.

$$EMQ = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.9)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\delta_i)^2} \quad (3.10)$$

$$EA_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}| \quad (3.11)$$

$$Viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i - \bar{x} \quad (3.12)$$

Sendo que  $x_i$  é a TSMsat e  $\bar{x}$  é a TSM<sub>in situ</sub>.

A análise de regressão linear é utilizada para verificar o quanto e como os dados in situ e de satélite covariam, auxiliando na identificação dos desvios aleatórios e sistemáticos. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ), é dado pela expressão

$$R^2 = \frac{SQR}{SQT} = 1 - \frac{SQE}{SQT} = \frac{\hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) Y_i}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (3.13)$$

onde SQR é a soma de quadrado da regressão, SQT a soma de quadrado total, SQE a soma de quadrados dos erros,  $\hat{\beta}_1$  é chamado de estimador de mínimo quadrado e  $Y_i$  é o valor observado. Portanto, a Equação 3.13 define que  $R^2$  é a razão entre a soma de quadrados da regressão e a soma de quadrados total (MONTGOMERY; PECK, 1992; PORTAL ACTION, a). O coeficiente de determinação é usado para complementar a

análise de incerteza com os outros parâmetros citados anteriormente.

### 3.3.2 ABI-GOES-16 vs. OSTIA e NOAA/NESDIS GEO-Polar Blended

A comparação entre a TSM L3 ABI-GOES-16 com os produtos de TSM globais L4 do OSTIA e Geo-Polar-Blended foi realizada também para o ano de 2018, utilizando a média diária do produto L3 ABI GOES-16 re-amostrada para o mesmo tamanho de grade (6 km) que os produtos L4.

**1) Seleção dos dados:** Primeiramente foi realizado um controle de qualidade dos dados de TSM ABI-GOES-16 horária, produzindo dois grupos: *a)* todos os dados com nível de qualidade 3–5, como realizado em [Picart e Marsouin \(2018\)](#) e *b)* todos os dados noturnos e apenas diurnos com a intensidade do vento  $\geq 6\text{m/s}$  (ainda utilizando nível de qualidade 3–5), para equivaler a TSM<sub>sub-pele</sub> do ABI GOES-16 a TSM<sub>fnl</sub> dos produtos L4. As informações de velocidade do vento e o nível de qualidade são fornecidos pelo próprio produto ABI-GOES-16. A velocidade do vento é obtida para cada pixel equivalente de TSM a partir de um modelo PNT (no caso o ECMWF). Após essa seleção nos dados, as médias diárias são geradas, para poder comparar com os produtos L4 (como já explicado, esses dados são disponibilizados diariamente).

**2) Reamostragem:** Um recorte contendo apenas a área de estudo (oceano adjacente à costa brasileira até 20°O, com limite norte de 10°N e sul de 45°S) foi aplicada tanto ao produto L3 como L4, facilitando assim, o processamento dos dados. Esse processo gerou um conflito de grade (ABI-GOES-16 tem grade de 0,05, enquanto o OSTIA e Geo-Polar-Blended tem grade de 0,054). Portanto, uma interpolação para a mesma grade teve que ser realizada. Entre as diversas interpolações disponíveis, a Interpolação Bilinear foi escolhida, devido a sua simplicidade, e por gerar um resultado mais suavizado sem alterar significativamente os valores originais, já que a resolução do L3 não é tão diferente do L4. Como na interpolação linear, mas agora para duas variáveis, a interpolação bilinear utiliza a média simples dos pixels originais que se encontram ao redor do novo pixel. Sua interpolação é dada pela Equação 3.14 ([PEDRINI; SCHWARTZ, 2007](#)):

$$\begin{aligned} f(x', y') = & (1 - dx)(1 - dy)f(x, y) + dx(1 - dy)f(x + 1, y) + \\ & + (1 - dx)dyf(x, y + 1) + dxdyf(x + 1, y + 1) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Na interpolação foram utilizados os produtos L4 como referência de grade.

**3) Diferenças L3 vs. L4:** Assim que, realizada a interpolação, foi extraída a diferença simples (viés, Equação 3.12) entre os dados diários de TSM OSTIA e Geo-Polar-Blended do ABI-GOES-16 (L3 - L4), para os grupos *a*) e *b*) explicados acima. Para analisar o resultado das diferenças espacialmente e temporalmente foram gerados mapas das diferenças médias para cada mês e estação do ano. Nas regiões com maiores diferenças foram realizadas algumas comparações entre os produtos L3 e L4 com dados in situ, a fim de verificar o desempenho de cada produto em regiões específicas, mais complexas.

### 3.3.3 Estudo de caso

Para o estudo de caso, comparando qualitativamente o desempenho dos produtos L3 e L4 em representar processos de mesoescala, foi selecionado um caso de ressurgência na costa do Rio de Janeiro no dia 14 de novembro de 2018. Para este estudo foram selecionados dois outros produtos de TSM além daqueles analisado no presente trabalho: o L3 ABI GOES-16 NOAA STAR e o L4 MUR (Tabela 3.4).

O produto L3 ABI GOES-16 NOAA STAR só foi utilizado nesta etapa, pois no início do trabalho este produto ainda estava em fase de avaliação e atualização do algoritmo (PETRENKO et al., 2019). A versão original do algoritmo usava um modelo de regressão ajustado com dados in situ de TSM, e a versão atual usa um modelo ajustado com um produto L4, como uma estratégia de aumentar a sensibilidade do algoritmo a variações locais de TSM com o ciclo diurno, por exemplo.

O produto MUR L4 foi adicionado, pois apesar de não ser um produto padrão utilizado como condição de contorno em modelos PNT e para a assimilação em modelos oceânicos, é um produto que tem sido muito utilizado em programas de monitoramento e estudos e processos meteoceanográficos por ter uma boa representatividade de processos de mesoescala (CHIN et al., 2017).

Tabela 3.4 - Produtos utilizados no estudo de caso da ressurgência de Cabo Frio e suas especificações

	OSTIA	MUR	ABI-GOES-16 OSI SAF	ABI-GOES-16 NOAA-STAR
Nome Curto	UKMO- L4HRfnd- GLOB- OSTIA	MUR-JPL- L4-GLOB- v4.1	GOES16- OSISAF-L3C- v1.0	ABI-G16- STAR-L2P- v2.70
Nível de Pro- cessamento	L4	L4	L3	L3
Resolução Horizontal	6 km	1 km	6 km	2 km
Profundidade	fundação	fundação	sub-pele	sub-pele
Resolução Temporal	diário	diário	horário	horário
Sensores	AVHRR, SEVIRI, IASI, TMI e ABI	AMSR-E, MODIS, AVHRR-3, WINDSAT e AMSR2	ABI	ABI

Para o processamento de todos os dados citados, programas como *Python*, *Climate Data Operators* (CDO) e *R* foram utilizados no decorrer deste trabalho. Todos os dados são públicos, e as ferramentas são *open source*.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise TSM ABI-GOES-16 vs in situ

Nesta primeira sessão dos resultados será apresentada a avaliação da TSM estimada pelo sensor ABI/GOES-16 analisada conforme a diferença entre os dados de satélite com os dados in situ ( $\Delta TSM = TSM_{sat} - TSM_{insitu}$ ), medido por boias de deriva e fixas. Estatísticas básicas da diferença como erro médio quadrático (EMQ), desvio padrão (DP), viés (média) e erro absoluto ( $EA_x$ ) foram calculadas para todo período de 2018 (conforme a disponibilidade dos dados), sendo algumas análises expostas por mês, estação do ano e todo período de 2018. Apenas dados de satélite com Nível de Qualidade (NQ) de 3-5 foram usados e analisados em um único conjunto e separados afim de avaliar a diferença no desempenho do produto de TSM para cada nível de qualidade. Picart e Marsouin (2018) demonstraram um degradamento da estatística para os pixels de nível de qualidade igual a 2 (viés de  $-0,4$  °C e DP em aproximadamente  $0,850$  °C), aconselhando a não utilização desses dados. No caso do conjunto de dados do PNBoia (fixa e de deriva) os dados foram ainda separados em dia e noite, a fim de avaliar o efeito da estratificação termal diurna na comparação da TSM in situ e satélite (sub-pele). No caso das boias fixas do PIRATA, para analisar este efeito, os dados foram eliminados conforme a intensidade do vento (eliminou com ventos  $< 6$  m/s) como explicado em mais detalhe na sessão anterior (Materiais e Métodos).

Os dados de TSM ABI-GOES-16 não são obtidos na presença de nuvens, de forma que muitos dados são descartados, portanto, além das análises pontuais (pixel centrado na localização da boia), também se fez uma expansão da busca de pixel livre de nuvens e com o nível de qualidade entre 3-5 com o pixel mais próximo à localização da boia, dentro da janela de busca de  $5 \times 5$  pixel (com total de 30 km de resolução).

#### 4.1.1 PNBoia - Boias de Deriva

No PNBoia de deriva, foram selecionados 9 boias, que atenderam ao critério de seleção de a) estar dentro da área de estudo e b) estar em funcionamento no ano de 2018. Várias destas boias tem dados interrompidos, i.e., não tem dados para todo o ano de estudo, conforme descrito abaixo:

- B116353: de 01/2018 a 03/2018;
- B116354: de 01/2018 a 12/2018;

- B116355: de 01/2018 a 12/2018;
- B116969: de 01/2018 a 03/2018;
- B126964: de 01/2018 a 06/2018;
- B126967: de 01/2018 a 04/2018;
- B127028: de 01/2018 a 05/2018;
- B127064: de 01/2018 a 11/2018;
- B127065: de 01/2018 a 12/2018.

Dos 48619 dados disponível para o ano de 2018 dessas nove boias, apenas 5155 para os dados pontuais e 17386 para a janela de 5x5 pixels passaram por todo processo de qualidade: as boias estarem dentro da área de estudo e não ser considerado *outlier*.

Diversos trabalhos (e.g. [Donlon et al. \(2002\)](#), [Donlon et al. \(2012\)](#), [Kent e Taylor \(2006\)](#), [Assireu et al. \(2011\)](#)) citam ou ilustram a importância do controle de qualidade dos dados in situ em relação à intensidade do vento para reduzir as diferenças entre a TSM satélite e in situ em exercícios comparativos. Entretanto, pouquíssimos dados de vento são disponibilizados no PNBoia, seja esses das boias fixas ou de deriva. Portanto, nesses dois casos, apenas análises no período noturno e diurno serão apresentadas, assim como realizadas anteriormente em outros trabalhos, tal como [Lazarus et al. \(2007\)](#), [Reynolds et al. \(2007\)](#), [Picart e Marsouin \(2018\)](#).

De forma geral, a Tabela 4.1 apresenta o resultado para dados pontuais e na janela de 5x5 pixel com níveis de qualidade 3, 4 e 5 juntos, nos períodos do dia, noite e dia/noite (juntos). Para os dados pontuais o viés, tanto de dia como de noite, e para todo o conjunto de dados, foi menor que 0,1 °C, e o erro absoluto menor que 0,5 °C (EMQ < 0,590) o que atende aos requisitos esperados para produtos operacionais de TSM ([GHR SST SCIENCE TEAM, 2011](#)). A comparação diurna apresentou um viés mais positivo (0,086 °C), o que é esperado devido à influência do aquecimento solar na camada superficial do mar, aumentando a diferença entre a TSM satélite (sub-pele, ~ 10 mm) e in situ ([PETRENKO et al., 2019](#)), que no caso dos derivadores é entre 10 a 15 cm ([ASSIREU et al., 2011](#)). Os dados noturnos tiveram um viés mais neutro (0,005 °C), indicando uma camada superficial mais misturada, como encontrado em outros trabalhos de validação ([PICART; MARSOUIN, 2018](#)). O erro absoluto e EMQ dos dados noturnos, no entanto, foram um pouco maiores (0,590 °C EMQ) que os dados diurnos (0,536 °C EMQ), o que pode estar relacionado a outros fatores de

incerteza, como a influência de nuvens finas, nuvens de topo baixo ("nuvens quentes") e nuvens sub-pixel, mais difíceis de serem mascaradas pela máscara de nuvens, com a redução do gradiente das TBs entre o topo das nuvens e a superfície do mar no período noturno.

Na janela de 5x5 pixel destaca-se a quantidade de dados, sendo mais que o triplo do grupo de dado pontual, e por mais que seu EMQ seja maior, a grande quantidade de dados é um fator a ser considerado. De fato, o viés e erro absoluto não aumentaram muito, supondo que esta janela de busca poderia ser adequada para aumentar o conjunto de dados comparativos entre a TSM satélite e in situ. O EMQ, no entanto, ficou acima de 0,6 °C o que já não é tão desejável. O aumento do erro nesta janela de busca de 5x5 pixel é devido, principalmente ao aumento no gradiente horizontal, que é crítico principalmente em regiões frontais onde o gradiente pode superar 0.5 °C por km (ASSIREU et al., 2011). No caso do Atlântico Sul, os derivadores usados no presente estudo, amostraram regiões de forte gradiente (abaixo de 20°S) na Zona de Confluência Brasil Malvinas (CBM) (PEZZI et al., 2005) e Zona de Convergência Subtropical do Atlântico Sul, por exemplo (veja Figura 3.3). Dessa forma, mesmo aumentando significativamente o número de comparações (do inglês, *match-ups*), nestas regiões de forte gradiente o uso da janela amostral mais degradada pode não ser tão adequado.

Tabela 4.1 - Estatística da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PNBoia de deriva para dado pontual e janela de 5x5 pixel, de nível de qualidade (NQ) 3-5 (juntos) com relação ao dia, noite e dia/noite: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ).

Período	Dado Pontual				Janela de 5x5 pixel			
	N	EMQ	Viés	$EA_x$	N	EMQ	Viés	$EA_x$
Dia	2827	0,536	0,086	0,408	9376	0,606	-0,016	0,452
Noite	2328	0,590	0,005	0,436	8010	0,664	-0,147	0,494
Dia e Noite	5155	0,561	0,049	0,421	17386	0,633	-0,076	0,471

Já as Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam os resultados para dados pontuais e janela de 5x5 pixel, respectivamente, comparando as boias de deriva com o pixel de qualidade 3-5 (separadamente), entre os períodos noturno e diurno. Para ambos os grupos (dado pontual e janela de 5x5 pixel), percebe-se uma melhoria na estatística conforme aumenta o nível de qualidade. Os erros porém não aumentam demasiadamente do nível 5 ao 3, corroborando com a recomendação de usar estes 3 níveis para aumentar

a cobertura de dados de TSM ([EUMETSAT OSI SAF MANUAL, 2018](#)). Análise parecida de viés foi registrado no estudo de [Picart e Marsouin \(2018\)](#), do qual realizou esse mesmo ensaio de TSM com o GOES-16, Meteosat-8 e 11, no período de janeiro a junho de 2018, para todo campo de visada destes satélites.

Tabela 4.2 - Estatística diurna e noturna da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PNBoia de deriva para dado pontual, por nível de qualidade (NQ) 3-5 (separado). Dados apresentado por: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ).

NQ	Noite				Dia			
	N	EMQ	Viés	$EA_x$	N	EMQ	Viés	$EA_x$
5	579	0,526	-0,040	0,403	729	0,477	0,062	0,365
4	943	0,618	0,043	0,446	1160	0,561	0,073	0,420
3	806	0,602	-0,008	0,450	938	0,546	0,121	0,426

Tabela 4.3 - Estatística diurna e noturna da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PNBoia de deriva para janela de 5x5 pixel, por nível de qualidade (NQ) 3-5 (separado). Dados apresentado por: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ )

NQ	Noite				Dia			
	N	EMQ	Viés	$EA_x$	N	EMQ	Viés	$EA_x$
5	912	0,586	-0,107	0,432	1020	0,549	0,017	0,404
4	2442	0,626	-0,085	0,455	2737	0,566	0,008	0,424
3	4656	0,696	-0,187	0,526	5619	0,634	-0,034	0,475

As séries temporais de estatísticas agrupadas em médias semanais (item *a*, *b* e *c* dos gráficos) e mensais (item *d* dos gráficos) dos dados pontuais e janela de 5x5 pixel são apresentadas na Figura 4.1 e 4.2, respectivamente, com níveis de qualidade 3-5 (juntos) para os períodos diurno e noturno separadamente. Alguns dias consecutivos ficaram sem dados causando uma descontinuidade na série analisada (19 dias no total para dados pontuais e 14 dias para janela de 5x5 pixel). Essa interrupção nos dados pode ter sido ocasionada por falta de coleta de dado (boias in situ) ou por bloqueio de nuvens naquele exato dia e horário (no caso dos dados ABI). O maior intervalo sem dado registrado para as comparações pontuais é no período de 12 a 18 de novembro, bem visível em todos itens da Figura 4.1. Para a busca de área de janela de 5x5

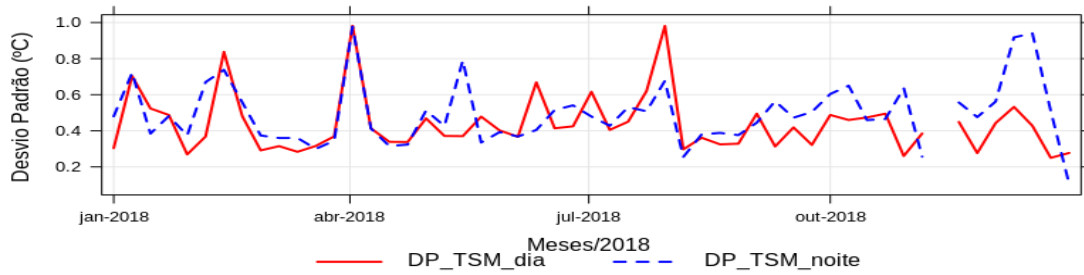
pixel, as interrupções diminuíram para apenas 6 dias sem dados (distribuídos pelo mês de novembro), o que proporciona uma visão quase ininterrupta da Figura 4.2.

O desvio padrão e viés (Figura 4.1(a) e (c)) são relativamente próximos quando comparado dia-noite entre si, com alguns vieses negativos e positivos observados tanto para noite como para o dia, mas com predomínio de viés positivo para os dados diurnos. Valores de DP mais elevados, chegando em aproximadamente  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  são verificados nos meses de abril, agosto e dezembro. Quanto ao viés, este apresentou valores negativos em janeiro ( $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e agosto (superior a  $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) tanto para os dados de dia e noite. No caso do mês de agosto, a cobertura de nuvens é maior neste período para a região amostrada pelos derivadores (ao sul de  $20^{\circ}\text{S}$ ), com o aumento na frequência de passagem de frentes frias (Figura 4.3). Portanto, a interferência de nuvens, principalmente no caso de nuvens finas e sub-pixel, que não são mascaradas adequadamente, pode ter causado este viés negativo na TSM ABI GOES-16. Já para o mês de janeiro o viés negativo pode ter sido decorrente do aumento na absorção do vapor d'água que está presente em maior concentração na atmosfera neste período na região de estudo (Figura 4.3).

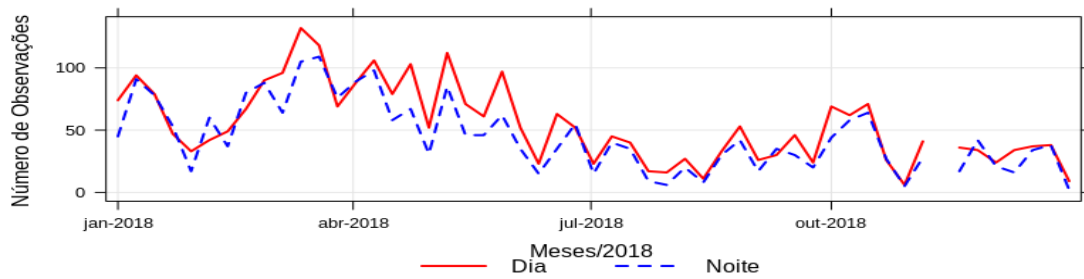
Com a expansão da área de busca (janela de  $5 \times 5$  pixel), e com a elevada quantidade de dados em relação aos dados pontuais (de 5155 para 17386 dados), concedeu-se continuidade nos dados de 2018, não o suficiente para eliminar a quebra temporal em novembro (Figura 4.2).

Comparação semelhante ao dado pontual pode ser feito para a de janela de  $5 \times 5$  pixel. A diferença neste caso, é que o desvio padrão de modo geral aumentou (em torno de  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) nos meses com menor frequência de dados devido à maior cobertura de nuvens (maio a novembro). Apesar da janela amostral aumentar significativamente o número de comparações, que seria importante principalmente nestas situações de elevada cobertura de nuvens, o aumento da janela também implica no aumento das incertezas devido ao maior gradiente horizontal, que também é crítico na região de estudo, como discutido anteriormente.

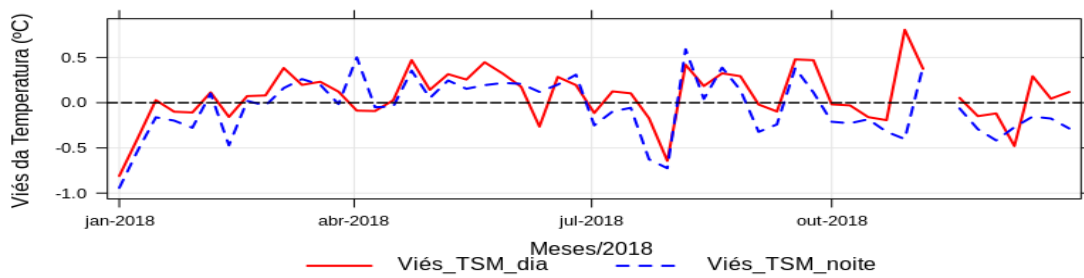
Figura 4.1 - Médias para o ano de 2018 (dado pontual) do PNBoia de deriva, com nível de qualidade 3-5 (juntos), no período noturno e diurno, sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) desvio padrão semanal, b) frequência semanal, c) viés semanal e d) média mensal da temperatura.



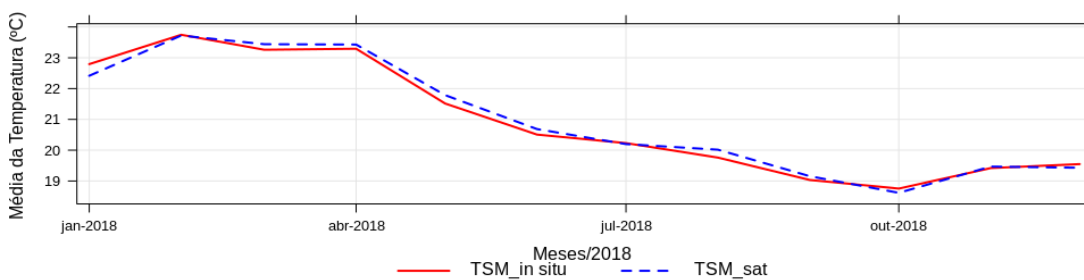
(a)



(b)



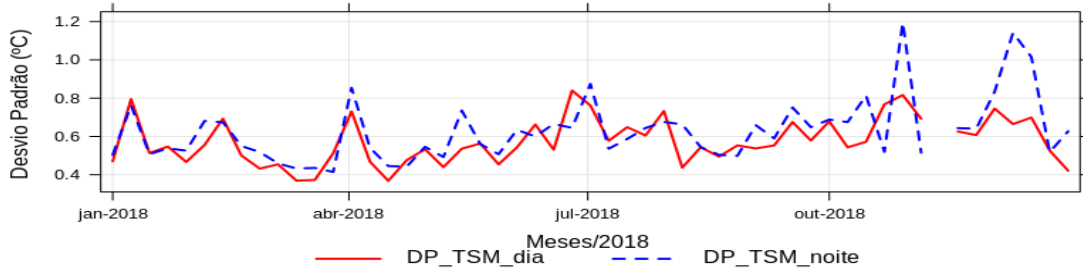
(c)



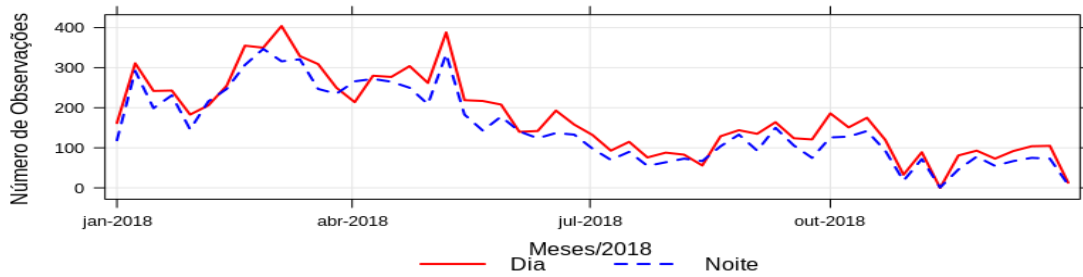
(d)

Fonte: Produção da Autora.

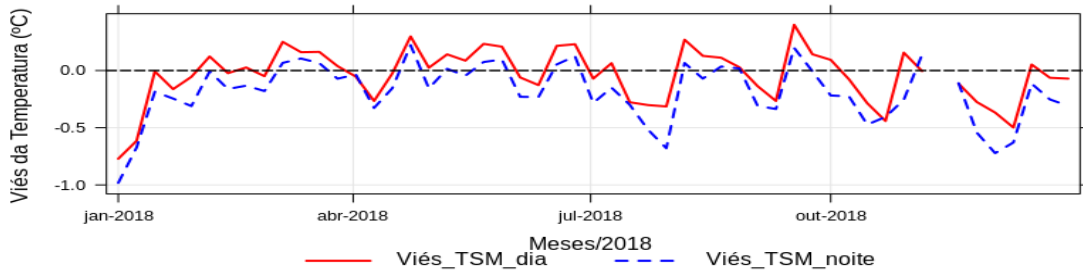
Figura 4.2 - Médias para o ano de 2018 (janela de 5x5 pixel) do PNBoia de deriva, com nível de qualidade 3-5 (juntos), no período noturno e diurno, sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) desvio padrão semanal, b) frequência semanal, c) viés semanal e d) média mensal da temperatura.



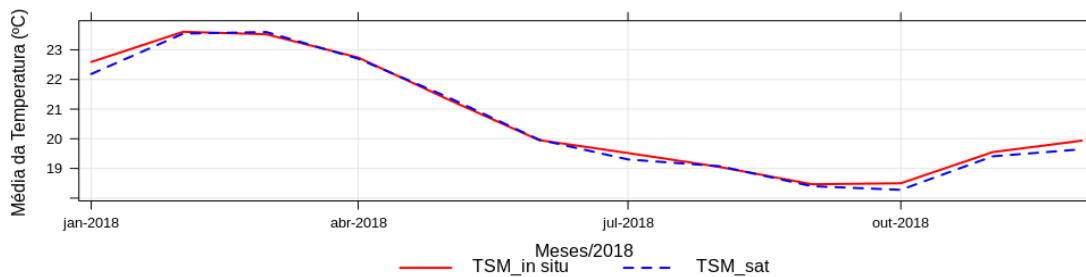
(a)



(b)



(c)

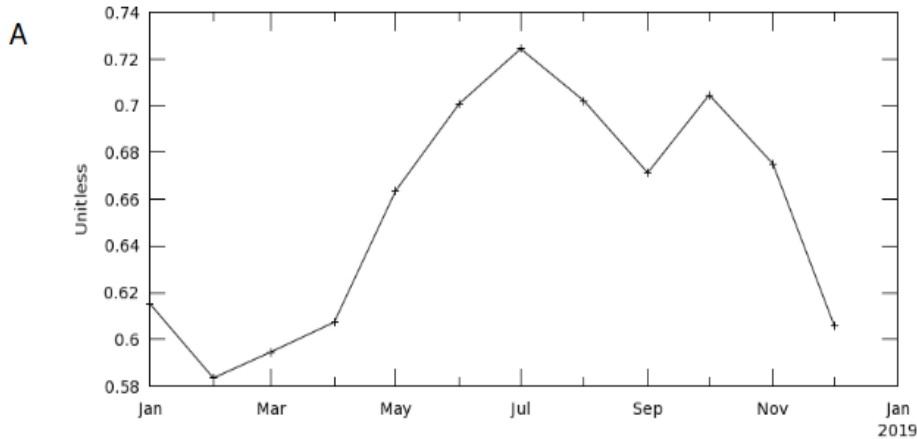


(d)

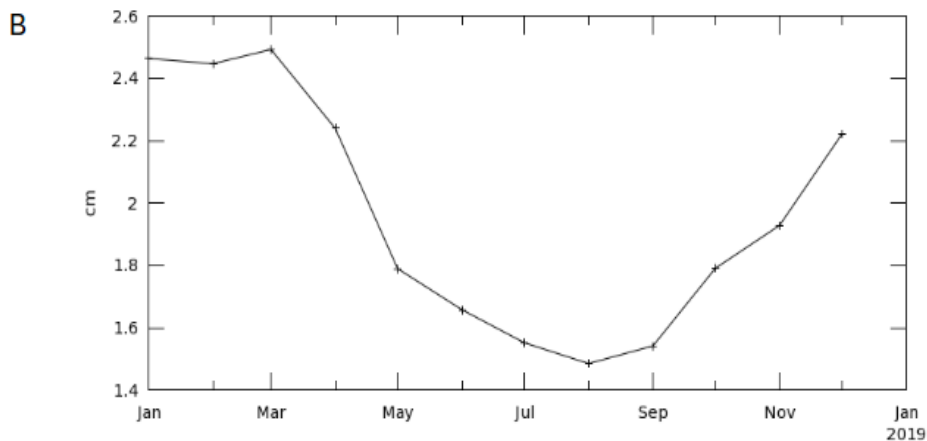
Fonte: Produção da Autora.

Figura 4.3 - a) Fração cobertura de nuvens MODIS-Terra, e b) Vapor d'água precipitável integrado na atmosfera MODIS-Terra, de Janeiro a Dezembro 2018 na região amostrada pelos derivadores (20-45°S; 20-65°O). Séries geradas pelo aplicativo giovanni.nasa.

Time Series, Area-Averaged of Cloud Fraction from Cloud Mask (count of lowest 2 clear sky confidence levels, cloudy & probably cloudy / total count) Day: Mean of Daily Mean monthly 1 deg. [MODIS-Terra MOD08\_M3 v6.1] over 2018-Jan - 2018-Dec, Region 65W, 45S, 20W, 20S



Time Series, Area-Averaged of Precipitable Water Vapor (IR Retrieval) Total Column: Mean of Level-3 QA Weighted Mean monthly 1 deg. [MODIS-Terra MOD08\_M3 v6.1] cm over 2018-Jan - 2018-Dec, Region 65W, 45S, 20W, 20S



- The user-selected region was defined by 65W, 45S, 20W, 20S. The data grid also limits the analyzable region to the following bounding points: 64.5W, 44.5S, 20.5W, 20.5S. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetted granules that went into making this visualization result.

Fonte: National Aeronautics and Space Administration (2020a).

Uma suavização pode ser examinada na média mensal entre as curvas de TSM de satélite e in situ, Figura 4.1(d) e 4.2(d), com máximo e mínimo de temperatura em fevereiro e outubro, respectivamente. Entre si, os dados de médias mensais da TSM in situ e de satélite assemelham-se um ao outro.

Utilizando a análise de dispersão (Figura 4.4 e 4.5) nos dados pontuais e de janela de 5x5 pixel, observamos uma correlação positiva entre a TSM de satélite e in situ, com o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) maior que 0,9 (Tabela 4.4) para quase todos



casos, seja para todo ano de 2018 ou por estação do ano. Expandindo a busca de pixel de qualidade 3-5 com até 5x5 pixel, percebe-se uma diminuição sutil do  $R^2$ . Esse valor alto do  $R^2$  ( $> 0,9$ ) avalia a qualidade do modelo/ algoritmo, determinando o quanto o modelo foi capaz de explicar a relação entre os dados in situ com os de satélite.

O coeficiente angular próximo de 1 também reflete os baixos valores de viés encontrados nas comparações ( $< 0,1$  °C), indicando uma boa acurácia dos dados de TSM ABI em relação aos dados in situ das boias de deriva.

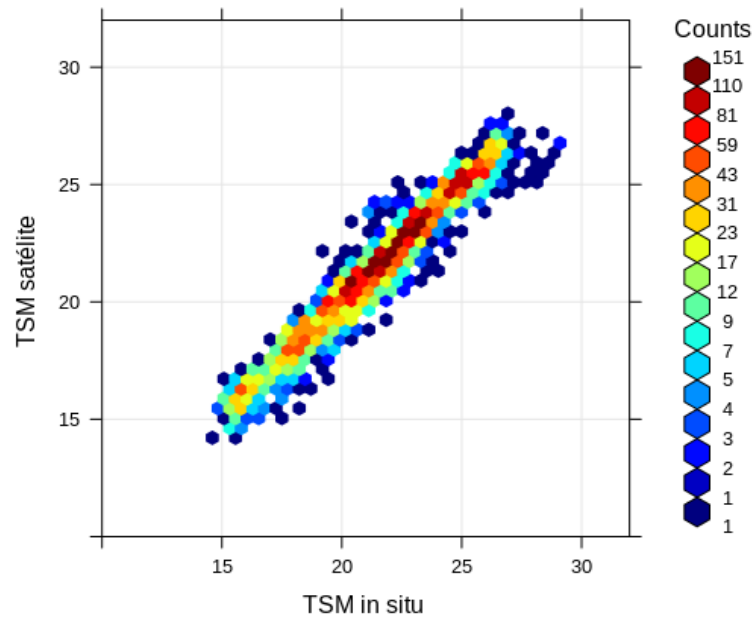
Tabela 4.4 - Estatística de dispersão da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PNBoia de deriva para dado pontual e janela de 5x5 pixel, por nível de qualidade (NQ) 3-5 (juntos), para todo ano de 2018 e por estação do ano. Dados apresentado por: Coeficiente Angular e  $R^2$  .

	<b>Dado Pontual</b>		<b>Janela de 5x5 pixel</b>	
	Coef. Angular	$R^2$	Coef. Angular	$R^2$
2018	0,99	0,96	0,99	0,95
Primavera	0,98	0,93	0,96	0,90
Verão	1	0,95	1	0,92
Outono	0,96	0,95	0,98	0,94
Inverno	0,97	0,95	0,98	0,93

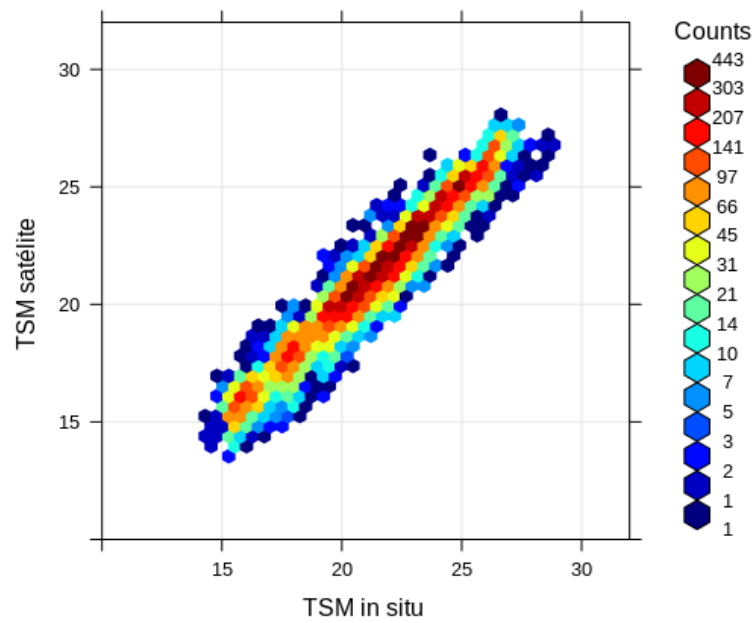
Os piores meses, com maior dispersão na comparação dos dados foram nas estações de primavera ( $R^2$ , 0,90) e inverno ( $R^2$ , 0,93) (Tabela 4.4 e Figura 4.5). Isso pode ser principalmente devido a menor quantidade de *match-ups* (dados concomitantes - in situ e satélite) neste período, com a maior cobertura de nuvens devido à maior frequência de passagem de frentes frias na região. Uma outra causa pode ser o aumento no gradiente horizontal da TSM devido à migração norte das correntes mais frias no extremo Sul do Atlântico Sul, e conseqüentemente das zonas frontais, i.e., confluência Brasil-Malvinas e zona de convergência subtropical do Atlântico Sul, que cobre a área amostrada pelos derivadores (ao sul de 20°S) (vejam as figuras da sessão 3 - área de estudo e derivadores). Outros fatores de incerteza nestas comparações podem ainda ser o aumento na incerteza da TSM satélite devido à limitações do algoritmo, principalmente em representar situações de valores extremos de vapor d'água atmosférico que podem ocorrer nesta região nas estações de verão-primavera (mais úmido) e outono-inverno (mais seco) (Figura 4.3); a sub-representatividade desta região na calibração do algoritmo, devido à quantidade limitada de dados in

situ, e maior atenuação atmosférica devido ao aumento no ângulo de visada do sensor (PETRENKO et al., 2019). Este último fator é crítico no extremo Sul do Atlântico Sul, que é justamente a região amostrada pelos derivadores analisados no presente estudo. Por fim, apesar dos derivadores serem considerados como fontes de referência de TSM in situ com alta qualidade dos dados, é possível que alguma incerteza nestes dados também influencie nas estatísticas. Apesar de todos estes fatores de incerteza, de modo geral o desempenho do produto ABI GOES-16 L3 OSI SAF ficou dentro dos requisitos do GHRSSST.

Figura 4.4 - Dispersão para o ano de 2018 do PNBoia de deriva, com nível de qualidade 3-5 (juntos), sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) dados pontuais e b) janela de 5x5 pixel.



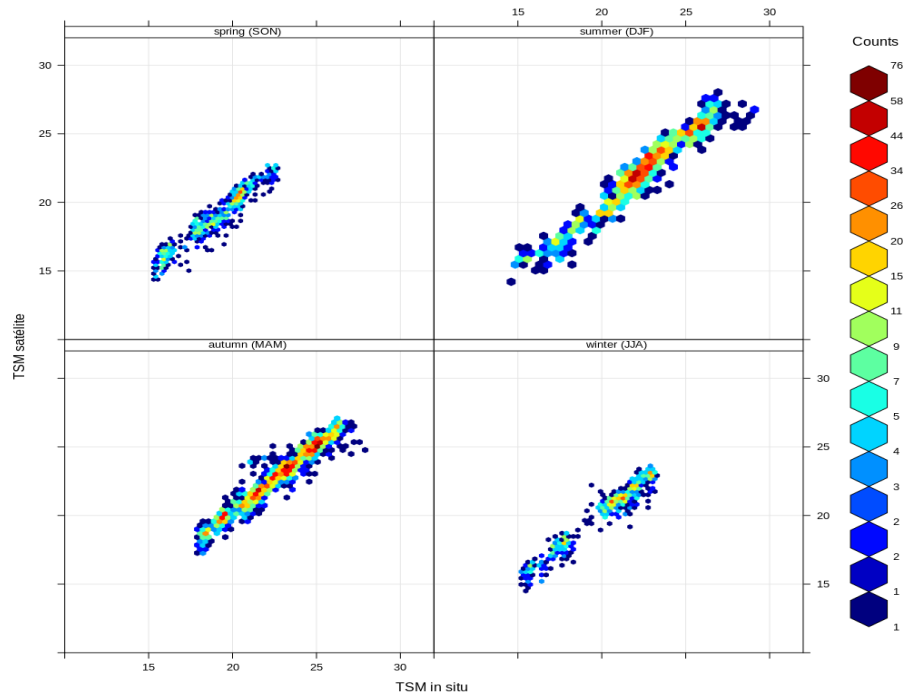
(a)



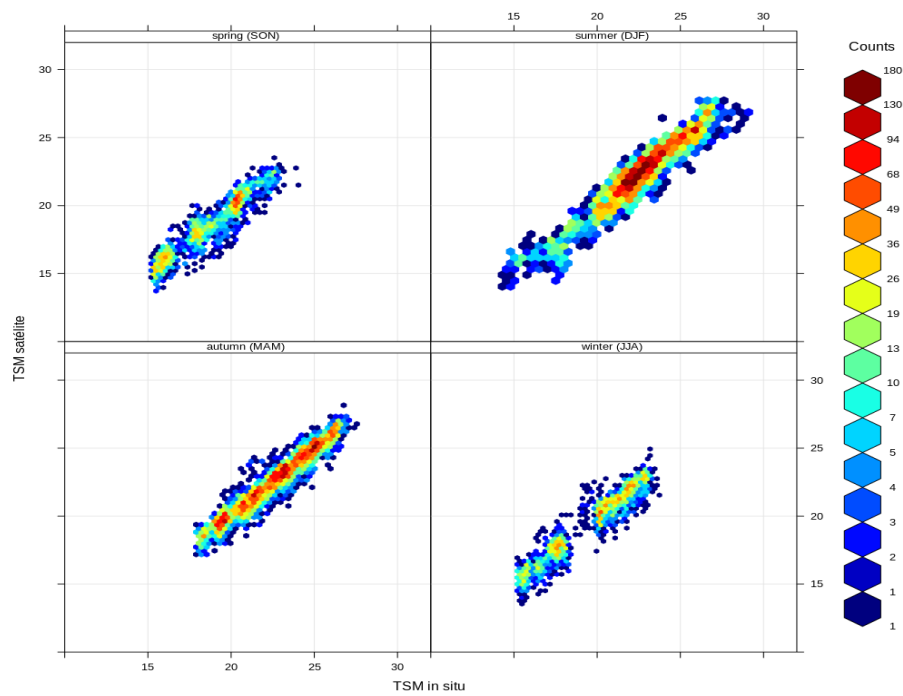
(b)

Fonte: Produção da Autora.

Figura 4.5 - Dispersão para as estações de 2018 do PNBoia de deriva, com nível de qualidade 3-5 (juntos), sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) dados pontuais e b) janela de 5x5 pixel.



(a)



(b)

Fonte: Produção da Autora.

#### 4.1.2 PNBoia - Boias Fixas

No PNBoia fixa, foram selecionadas 5 boias, que atenderam ao critério de seleção de *a)* estar dentro da área de estudo e *b)* estar em funcionamento no ano de 2018. Várias boias tem dados interrompidos, i.e., não tem dados para todo o ano de estudo. As boias selecionadas, sua posição e seu tempo de dados disponíveis podem ser vistos abaixo:

- Bcabo-frio3 (-23,63°; -42,20°): 01/2018;
- Bcabo-frio4 (-22,89°; -43,13°): 09/2018 a 12/2018;
- Bniteroi (-22,88°; -43,14°): de 01/2018 a 07/2018;
- Bsanta-catarina2 (-27,40°; -47,27°): de 01/2018 a 12/2018;
- Bsantos3 (-25,44°; -45,04°): de 01/2018 a 07/2018.

Dos 6740 dados disponíveis para o ano de 2018 dessas cinco boias, apenas 927 para os dados pontuais e 2345 para janela de 5x5 pixels passaram por todo processo de qualidade.

Assim como no tópico anterior, pouquíssimos dados de vento foram disponibilizados no PNBoia fixa. Portanto, apenas análises no período noturno e diurno serão apresentados, como realizadas nos trabalhos citados anteriormente.

De forma geral, a Tabela 4.5 apresenta o resultado para dados pontuais e de janela de 5x5 pixel com os níveis de qualidade 3, 4 e 5 juntos, para o dia, noite e dia/noite (juntos). Constata-se valores de EMQ e  $EA_x$  maiores para o período diurno nos dados pontuais, e o contrário para janela de 5x5 pixel. Na janela de 5x5 pixel destaca-se a quantidade de dados, mais que o dobro, entretanto, as estatísticas de erro também são maiores.

Para o conjunto de dados pontuais, os dados diurnos tiveram um viés positivo de 0,120 °C, que pode ser em parte explicado pela estratificação termal diurna, com a TSM satélite (sub-pele) mais quente que a TSM in situ, durante o dia. Já os dados noturnos tiveram um viés médio sutilmente negativo (-0,044 °C) que também pode ser parcialmente explicado pela estratificação termal noturna, com a TSM sub-pele mais fria em relação à TSM in situ, devido ao fluxo de calor entre a atmosfera e o oceano (DONLON et al., 2002; ASSIREU et al., 2011). Mesmo assim, para os dados

pontuais, o viés médio total (dia e noite) ficou abaixo de 0,1 °C (0,052 °C) com erro absoluto de 0,4 °C e EMQ de 0,65 °C. Isso indica um bom desempenho médio entre a TSM ABI GOES-16 e as boias fixas. No caso da janela amostral de 5x5 pixel, os maiores erros sugerem um gradiente horizontal importante na região amostrada, e que portanto, esta janela não deve ser adequada para a comparação nesta região mais costeira (coberta pelo PNBoia fixa).

Tabela 4.5 - Estatística da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PNBoia fixa para dado pontual e janela de 5x5 pixel, de nível de qualidade 3-5 (juntos) com relação ao dia, noite e dia/noite: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ).

Período	<b>Dado Pontual</b>				<b>janela de 5x5 pixel</b>			
	N	EMQ	Viés	$EA_x$	N	EMQ	Viés	$EA_x$
Dia	547	0,682	0,120	0,439	1333	0,768	-0,046	0,528
Noite	380	0,612	-0,044	0,398	1012	0,769	-0,199	0,543
Dia e Noite	927	0,654	0,052	0,422	2345	0,769	-0,112	0,534

As Tabelas 4.6 e 4.7 apresentam os resultados para dados pontuais e de janela de 5x5 pixel, respectivamente, comparando as boias fixas com o pixel de qualidade 3-5 (separadamente) nos períodos noturno e diurno. O EMQ e  $EA_x$  diurno mostrou-se maior em ambos casos (dia e noite) para os níveis 3 e 4, e foram maiores de dia do que de noite, sendo que de dia o viés foi positivo e de noite negativo. Comportamento esperado, devido a fatores como aquecimento solar e não eliminando dados com relação a intensidade do vento, causando impacto nos resultados. Tal comportamento também foram apresentados nos trabalhos de Donlon et al. (2002), Lazarus et al. (2007), Petrenko et al. (2010) etc. A escassez dos dados in situ para este conjunto do PNBoia fixa, também deve ter contribuído para a piora nas estatísticas de comparação dividida por níveis de qualidade. Essa discrepância pode ser ocasionada pela qualidade dos dados in situ, que são muitas vezes escassos e errôneos. Em ambos os casos, nota-se uma melhoria significativa na estatística de EMQ e  $EA_x$  conforme aumenta o nível de qualidade.

Tabela 4.6 - Estatística diurna e noturna da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PNBoia fixa para dado pontual, por nível de qualidade (NQ) 3-5 (separado). Dados apresentado por: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ).

NQ	Noite				Dia			
	N	EMQ	Viés	$EA_x$	N	EMQ	Viés	$EA_x$
5	259	0,408	-0,013	0,290	344	0,441	0,094	0,308
4	81	0,817	-0,102	0,577	134	0,847	0,071	0,565
3	40	1,050	-0,123	0,737	69	1,149	0,344	0,851

Tabela 4.7 - Estatística diurna e noturna da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PNBoia fixa com janela de 5x5 pixel, por nível de qualidade (NQ) 3-5 (separado). Dados apresentado por: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ).

NQ	Noite				Dia			
	N	EMQ	Viés	$EA_x$	N	EMQ	Viés	$EA_x$
5	388	0,533	-0,105	0,368	462	0,537	0,019	0,358
4	300	0,912	-0,118	0,653	387	0,815	-0,040	0,547
3	324	0,859	-0,388	0,652	484	0,907	-0,113	0,674

As séries temporais de estatísticas semanal dos dados pontuais e janela de 5x5 pixel são apresentadas na Figura 4.6 e 4.7 para os níveis de qualidade 3-5 (juntos) no períodos diurno e noturno separados, com diversos dias sem dados (total de 152 dias para dados pontuais e 61 para janela de 5x5 pixel). O maior intervalo sem dado registrado está entre o final de junho a setembro para dado pontual e final de junho a outubro para janela 5x5 pixel, bem visível em todos itens das figuras a seguir.

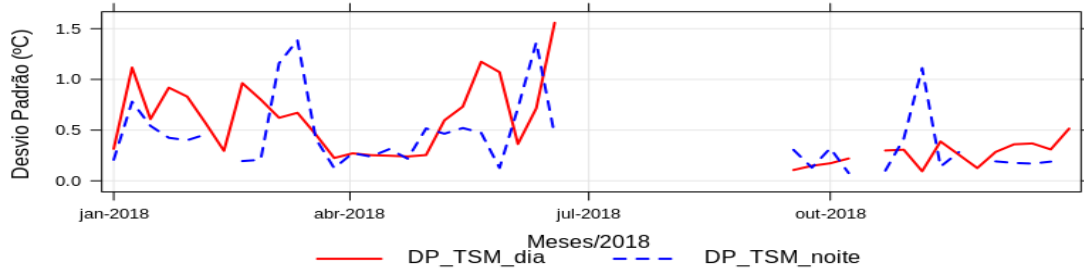
O desvio padrão e viés (Figura 4.6(a) e (c)) exibem picos de contraste quando comparando dia-noite entre si, principalmente em março, junho e novembro para o DP e meados de fevereiro, março e junho para o viés. O viés tem maior estabilidade, quando comparado com DP, mas ainda assim ocorre diferenças entre os períodos noturno e diurno.

Com a expansão da área de busca (janela de 5x5 pixel), e com a elevada quantidade de dados em relação aos dados pontuais (de 927 para 2345 dados), impulsionou a estabilização do DP e viés, sendo ambos mais parecidos para o conjunto diurno e noturno por mais que apresentem picos com altos valores ( $\sim \pm 1,5$  °C).

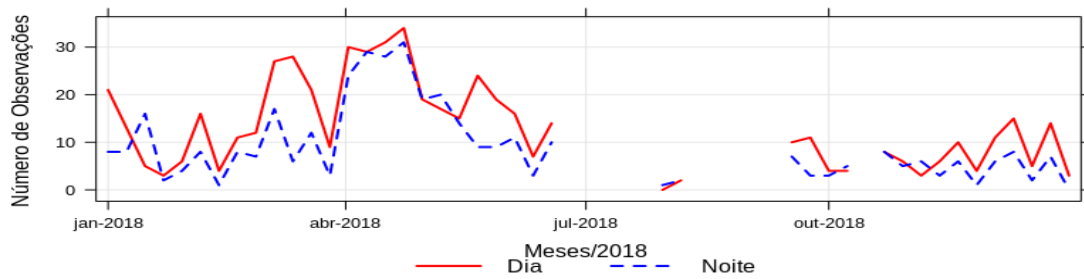
Comparando as semelhanças e diferenças entre os dados pontuais e de janela de 5x5 pixel, averiguamos que o ápice do desvio padrão em junho, foi de aproximadamente 1,5 °C. Ambos os conjuntos de dados (pontuais e com maior janela de busca, Figuras 4.6 e 4.7), para junho a agosto, apresentam uma diferença entre as médias mensais de temperatura entre a TSM in situ e de satélite, como consta no item (d) em ambas figuras, provocado principalmente pela falta de dados nesse período. Para ambos os conjuntos de dados, o viés dos dados de dia foram mais positivos, enquanto que o viés dos dados de noite foram mais negativos por motivos já explicados anteriormente, relacionado à estratificação termal diurna e noturna da camada superficial do mar.



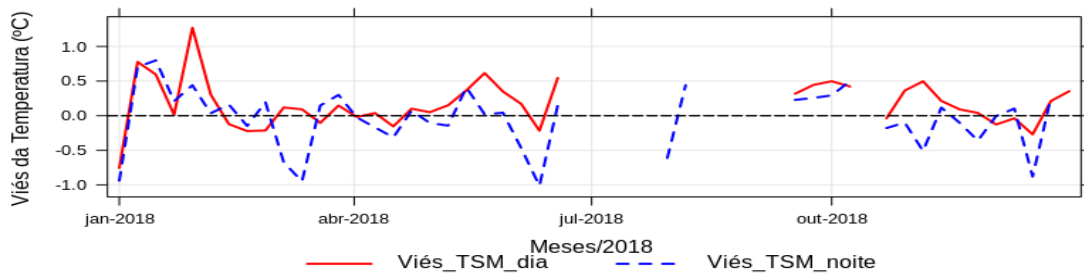
Figura 4.6 - Médias para o ano de 2018 (dado pontual) do PNBoia fixa, com nível de qualidade 3-5 (juntos), no período noturno e diurno, sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) desvio padrão semanal, b) frequência semanal, c) viés semanal e d) média mensal da temperatura.



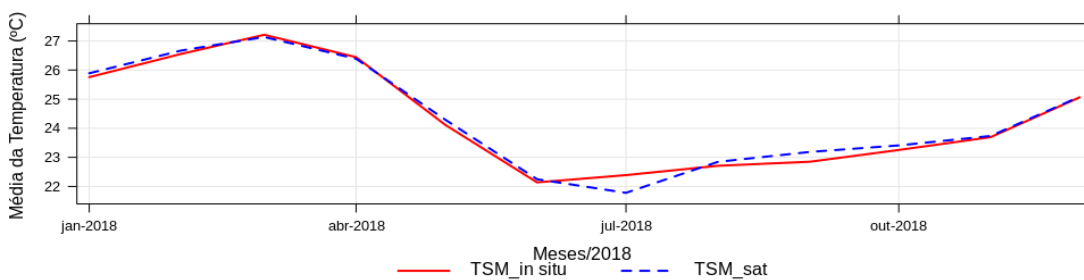
(a)



(b)



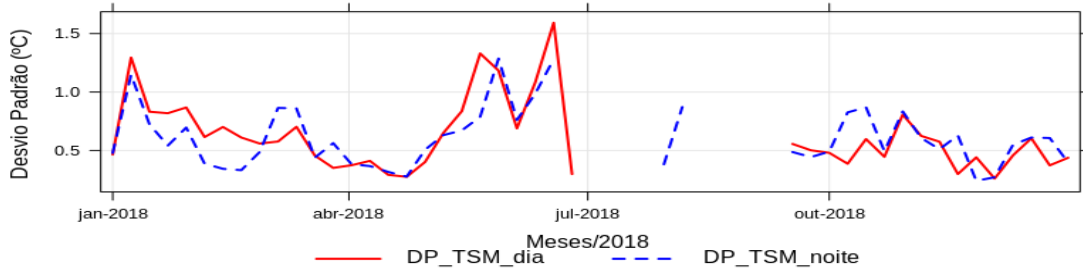
(c)



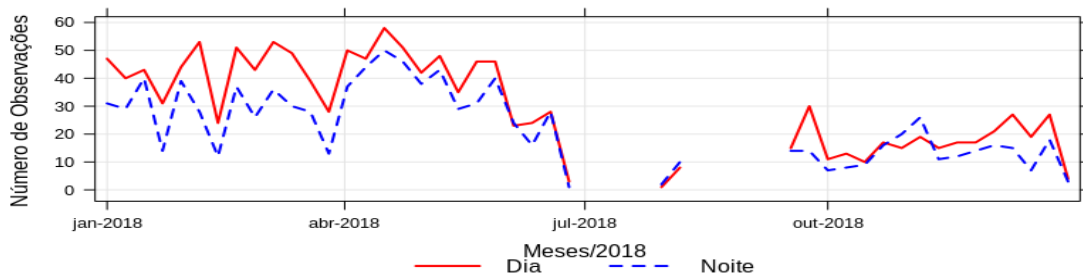
(d)

Fonte: Produção da Autora.

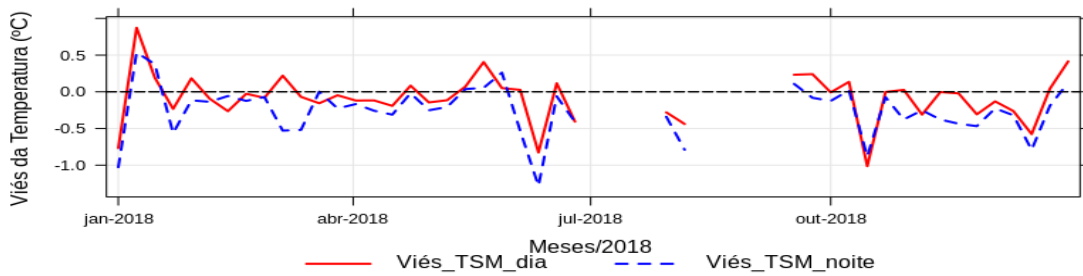
Figura 4.7 - Médias para o ano de 2018 (janela de 5x5 pixel) do PNBoia fixa, com nível de qualidade 3-5 (juntos), no período noturno e diurno, sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) desvio padrão semanal, b) frequência semanal, c) viés semanal e d) média mensal da temperatura.



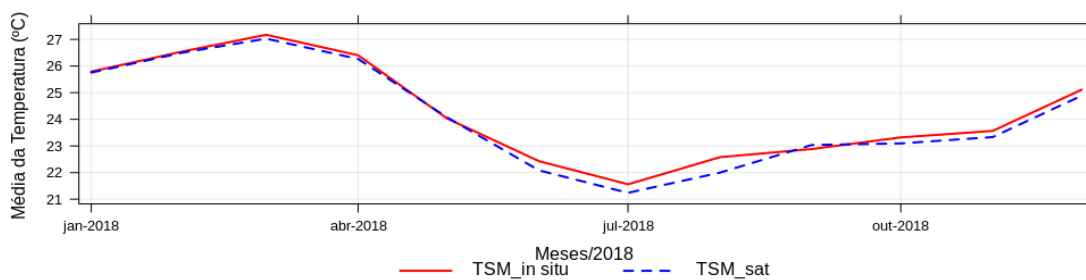
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Produção da Autora.

Utilizando a análise de dispersão (Figura 4.8 e 4.9) nos dados pontuais e janela de 5x5 pixel, observamos uma correlação fortemente positiva entre a TSM de satélite e in situ, com o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) alto (Tabela 4.8) para todo ano de 2018, mas relativamente mais baixo para cada estação. Expandindo a busca de pixel de qualidade 3-5 para a janela de 5x5 pixel, percebe-se uma diminuição do  $R^2$ .

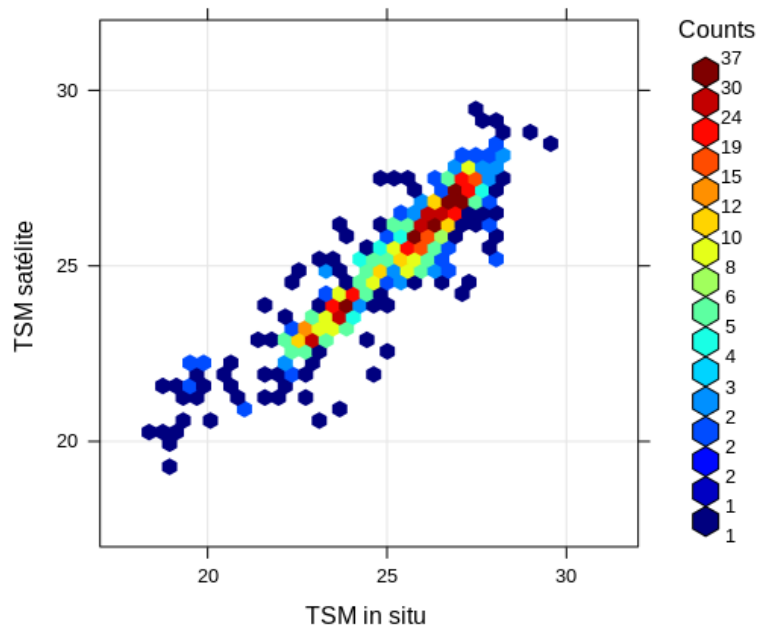
Tabela 4.8 - Estatística de dispersão da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PNBoia fixa para dado pontual e janela de 5x5 pixel, por nível de qualidade (NQ) 3-5 (juntos), para todo ano de 2018 e por estação do ano. Dados apresentado por: Coeficiente Angular e  $R^2$ .

	<b>Dado Pontual</b>		<b>janela de 5x5 pixel</b>	
	Coef. Angular	$R^2$	Coef. Angular	$R^2$
2018	0,87	0,87	0,89	0,83
Primavera	0,87	0,54	0,70	0,24
Verão	0,77	0,64	0,74	0,57
Outono	0,83	0,85	0,82	0,84
Inverno	0,49	0,57	0,44	0,45

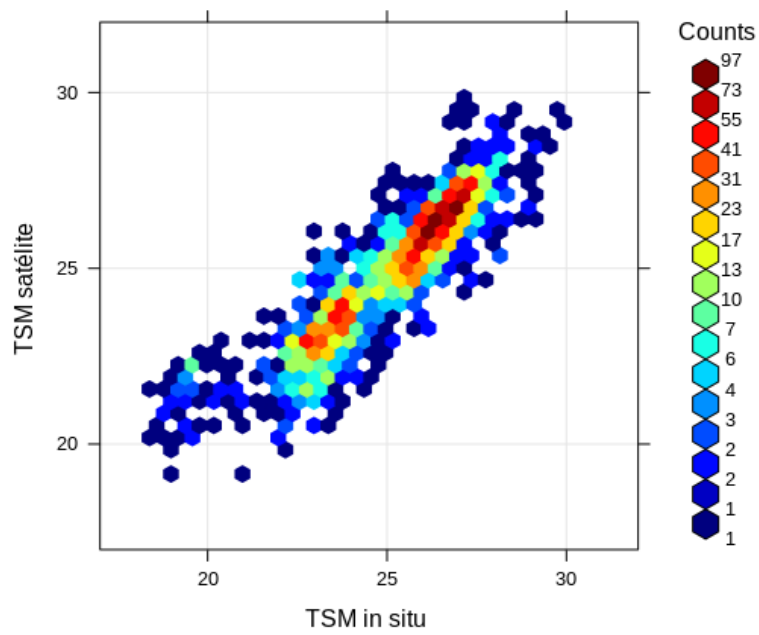
De modo geral as comparações da TSM in situ e de satélite foram piores para o conjunto de dados das boias fixas do programa PNBoia (comparada às boias de deriva). Os dados in situ das boias fixas apresentam mais problemas devido ao maior tempo de aquisição de dados por estes sensores, e influência de desvios na calibração e intemperismos. A manutenção e calibração destes sensores são difíceis, colocando em xeque o seu uso em exercícios de *match-up* como este. No entanto, é válida a sua comparação, pois estas boias cobrem uma área singular na costa brasileira que precisa ser avaliada em termos de desempenho dos produtos de TSM por satélite. Ainda que as estatísticas de erro foram maiores, no geral o viés ficou ainda em média abaixo de 0,1 °C e o erro absoluto abaixo de 0,5 °C. A covariação entre as duas TSMs também demonstra que ambas representam bem as variações naturais da TSM na região costeira do Brasil. Além dos desafios na qualidade dos dados in situ deste programa, o gradiente horizontal na região mais costeira também é um fator importante que pode ter prejudicado estas comparações, mostrado com o aumento nas estatísticas de erro para a janela amostral de 5x5 pixel. A piora na estatística de verão pode ser decorrente tanto devido ao aumento da influência de nuvens como de frentes termais provocados por ressurgências costeiras que ocorrem neste período em diferentes pontos da costa Brasileira. A maior cobertura de nuvens no verão, na área amostrada pelas boias fixas do PNBoia, se deve principalmente à

atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) no sudeste e Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) no litoral norte-nordeste. Não só a ZCAS, mas pelo fato de ser a estação mais úmida há mais convecção, e portanto a formação de nuvens convectivas. No inverno a maior cobertura de nuvens ocorre devido ao aumento na frequência de passagem de frentes frias na região sul-sudeste. A região costeira sul-sudeste também fica com um gradiente horizontal mais acentuado no inverno devido à atuação de uma corrente costeira que se propaga na direção norte trazendo águas mais frias vindas de sul, e fazendo frente com a Corrente do Brasil (mais quente) (SOUZA; ROBINSON, 2004). Esta corrente é conhecida como Corrente Costeira do Brasil.

Figura 4.8 - Dispersão para o ano de 2018 do PNBoia fixa, com nível de qualidade 3-5 (juntos), sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) dados pontuais e b) janela de 5x5 pixel.



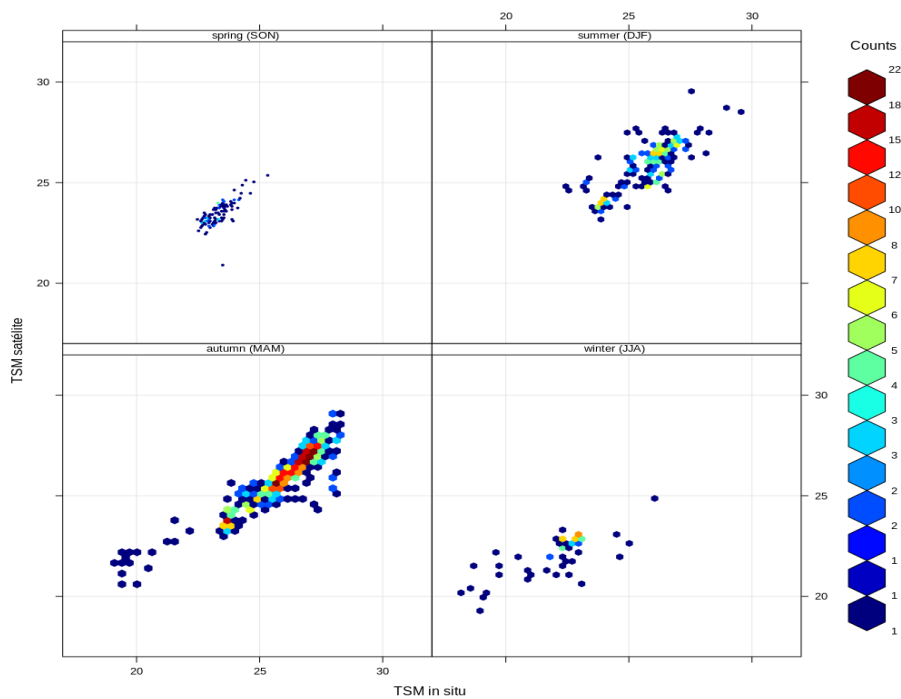
(a)



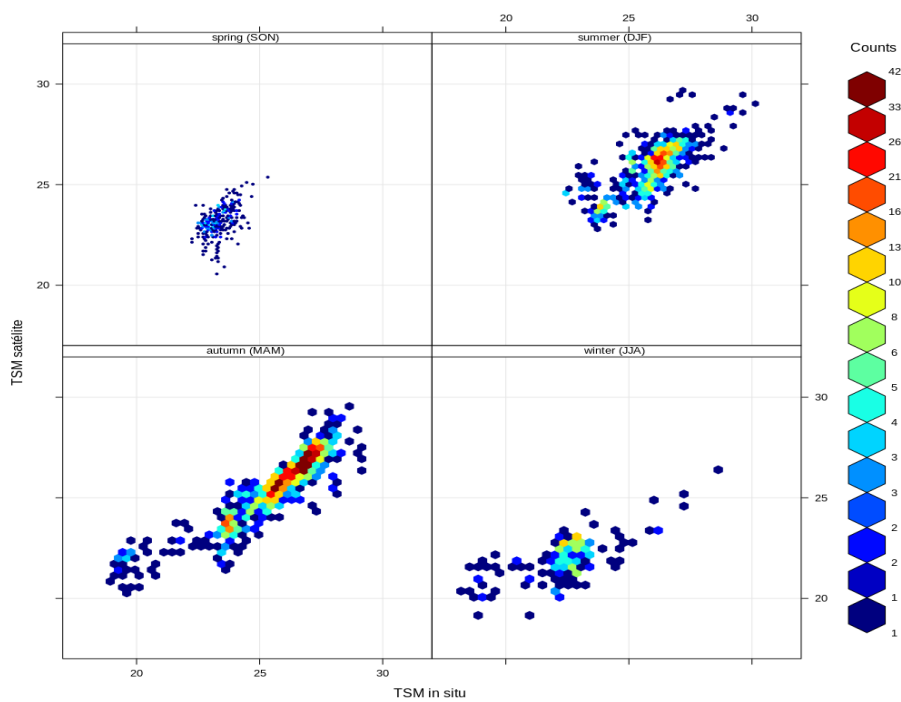
(b)

Fonte: Produção da Autora.

Figura 4.9 - Dispersão por estações de 2018 do PNBoia fixa, com nível de qualidade 3-5 (juntos), sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) dado pontual e b) janela de 5x5 pixel.



(a)



(b)

Fonte: Produção da Autora.

### 4.1.3 PIRATA

Foram selecionadas 7 boias do PIRATA, que atenderam ao critério de seleção de *a*) estar dentro da área de estudo e *b*) estar em funcionamento no ano de 2018. Várias boias tem dados interrompidos, i.e., não tem dados para todo o ano de estudo. As boias do PIRATA contam com 14 níveis de profundidade (de 1 a 500 m), e para essa etapa, foram selecionadas duas profundidades: 1 m e 10 m. As boias selecionadas e o tempo de funcionamento podem ser vistos abaixo:

- 0° 23°O:
  - Profundidade de 1 m: de 03/2018 a 11/2018
  - Profundidade de 10 m: de 01/2018 a 11/2018
- 0° 35°O:
  - Profundidade de 1 m: 01/2018
  - Profundidade de 10 m: 01/2018
- 4°N 23°O:
  - Profundidade de 1 m: de 03/2018 a 11/2018
  - Profundidade de 10 m: de 01/2018 a 11/2018
- 4°N 38°O:
  - Profundidade de 1 m: de 01/2018, 10/2018 e 11/2018
  - Profundidade de 10 m: de 01/2018 a 03/2018 e 10/2018 a 11/2018
- 8°S 30°O:
  - Profundidade de 1 m: de 01/2018 a 11/2018
- 14°S 32°O:
  - Profundidade de 1 m: de 01/2018 a 11/2018
- 19°S 34°O:
  - Profundidade de 1 m: de 01/2018 a 11/2018
  - Profundidade de 10 m: de 01/2018 a 11/2018

Dos 2191 dados disponíveis para o ano de 2018 dessas sete boias, apenas 1245 para os dados pontuais e 1949 para a janela de 5x5 pixels passaram por todo processo de qualidade.

Os dados que serão apresentados a seguir não foram separados pela intensidade do vento, portanto, foram utilizados todos os dados, apenas eliminando dados espúrios.

A primeira Tabela (4.9) apresenta o resultado para dados pontuais e janela de 5x5 pixel com os níveis de qualidade 3, 4 e 5 juntos, por média diária (sem distinção entre dia e noite). A comparação da média diária da TSM ABI GOES-16 com a TSM das boias PIRATA foram melhores que as comparações horárias do PNBoia, tanto para o dado pontual como para a janela de 5 x 5, com EMQ < 0,5 °C. O gradiente horizontal no Atlântico Tropical (onde estão as boias PIRATA) é menos acentuado que nas regiões costeiras e sul do Atlântico Sul (amostrados pelo PNBoia), o que permite aumentar a janela de *match-up* sem prejudicar significativamente as estatísticas de erro. Em relação à profundidade, o melhor valor de EMQ foi para a comparação da TSM in situ a 1 m (EMQ de 0,390 °C), mas mesmo à 10 m o EMQ foi de 0,5 °C e o viés de -0,01 °C (dados pontuais). Ou seja, uma diferença média pequena denotando pouca influência da estratificação termal diurna na comparação da média diária. De modo geral, a média diária da TSM tem melhor controle de qualidade para eliminar a influência de pequenas variações devido à estratificação diurna e interferência de nuvens, por exemplo, melhorando as comparações da TSM satélite e in situ, neste caso (do programa PIRATA). O viés da TSM ABI para a média diária foi sutilmente negativo tanto para a profundidade de 1 m (-0,063 °C) como de 10 m (-0,010 °C) indicando que na média, o perfil vertical da TSM comporta-se um pouco estratificado, com TSM sub-pele mais fria devido aos fluxos de calor com a atmosfera, que a TSM à 1 m (com o aquecimento diurno) e uma diminuição até 10 m na base da camada de mistura diurna (veja a Figura 2.3 como exemplo).

Tabela 4.9 - Estatística da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PIRATA para dado pontual e janela de 5x5 pixel, de nível de qualidade 3-5 (juntos), sem controle de qualidade por intensidade do vento, nas profundidades de 1 e 10 m: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ).

	Profundidade 1 m				Profundidade 10 m			
	N	EMQ	Viés	$EA_x$	N	EMQ	Viés	$EA_x$
Dado Pontual	702	0,390	-0,063	0,284	543	0,506	-0,010	0,374
Janela 5x5 pixels	1055	0,482	-0,124	0,340	894	0,598	-0,076	0,432



Já as Tabelas 4.10 e 4.11 apresentam os resultados para dados pontuais e de janela de 5x5 pixel, respectivamente, comparando os dados de TSM com o pixel de qualidade 3-5 (separadamente). Sendo assim, percebe-se uma melhoria na estatística conforme aumenta o nível de qualidade, porém o número de *match-ups* reduziu significativamente (de 401 para 42, à 1 m), implicando numa perda muito elevada da TSM satélite para o nível mais alto (5) (N=42 e EMQ = 0,22 °C). Em ambas tabelas o desvio padrão e erro absoluto mostraram-se melhores para as profundidades de 1 m do que 10 m. Já o viés apresentou valores negativos em quase todos NQ e profundidade (exceto em NQ 5 e 4 da profundidade de 10 m dos dados pontuais), reforçando estimativas de TSM mais fria do satélite que das boias. Para a janela de 5x5 pixel, as estatísticas foram levemente maiores do que os dados pontuais, indicando uma menor influência do gradiente horizontal, neste caso (do Atlântico Tropical), como discutido anteriormente.

Tabela 4.10 - Estatística da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PIRATA para dado pontual, de nível de qualidade (NQ) 3-5 (separado), sem controle de qualidade por intensidade do vento, nas profundidades de 1 e 10 m: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ).

NQ	Profundidade 1 m				Profundidade 10 m			
	N	EMQ	Viés	$EA_x$	N	EMQ	Viés	$EA_x$
5	42	0,226	-0,046	0,162	11	0,383	0,020	0,331
4	259	0,328	-0,031	0,254	172	0,411	0,045	0,332
3	401	0,437	-0,086	0,315	360	0,549	-0,038	0,396

Tabela 4.11 - Estatística da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PIRATA para janela de 5x5 pixel, de nível de qualidade (NQ) 3-5 (separado), sem controle de qualidade por intensidade do vento, nas profundidades de 1 e 10 m: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ).

NQ	Profundidade 1 m				Profundidade 10 m			
	N	EMQ	Viés	$EA_x$	N	EMQ	Viés	$EA_x$
5	47	0,245	-0,076	0,180	15	0,385	-0,083	0,340
4	325	0,372	-0,082	0,278	225	0,445	-0,016	0,350
3	683	0,537	-0,148	0,381	654	0,647	-0,097	0,462

As séries temporais de estatísticas semanal dos dados pontuais e de janela de 5x5 pixel são apresentadas na Figura 4.10 e 4.11 para os níveis de qualidade 3-5 (juntos), com diversos dias sem dados: para os dados pontuais, 101 e 96 dias para as profundidades de 1 e 10 m, respectivamente, e para a janela de 5x5 pixel, são 56 dias para ambas profundidades. A única interrupção contínua dos dados foi registrada em dezembro, pois não foi disponibilizado/coletado dado para este mês, independentemente da profundidade.

O desvio padrão (Figura 4.10(a) e 4.11(a)) apresentou vários picos de janeiro a maio (sendo que para a profundidade de 10 m os desvios são maiores de que 1 m), em alguns casos, próximo de 1 °C. As maiores diferenças entre a TSM ABI e a TSM in situ neste período (jan-mai) podem ser em parte explicados pela maior estratificação termal diurna na estação de verão-outono, e em parte pela maior influência da cobertura de nuvens e vapor d'água atmosférico (Figura 4.12), limitando o desempenho do algoritmo de TSM no Atlântico Tropical para estes meses. De julho em diante observa-se uma homogeneização entre os dados, tornando-se mais nivelado, e indicando um melhor desempenho da TSM satélite nos meses de inverno-primavera para o Atlântico Tropical.

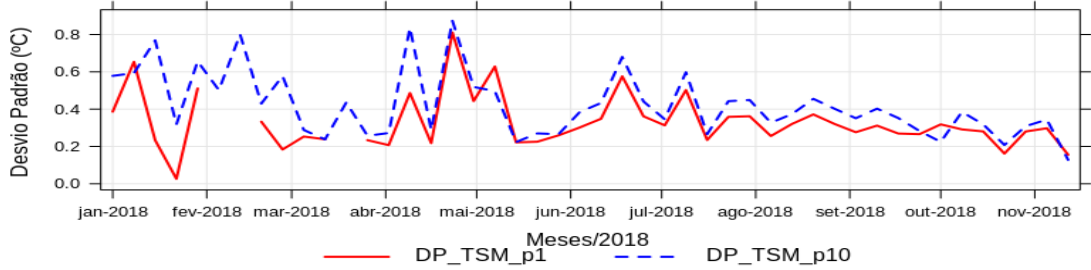
O viés (Figura 4.10(c) e 4.11(c)) salienta valores constantes (próximo a 0) para os dados pontuais, com um pico em janeiro (chegando até 1° C), e variável para a janela de 5x5 pixel, com picos tanto positivos como negativos. Entretanto, seu comportamento (seja pontual ou janela de 5x5 pixel) mostra-se relativamente mais negativo, com exceção entre março e começo de maio para dado pontual, o qual apresentou comportamento positivo.

A expansão da área de busca, e com a elevada quantidade de dados em relação aos dados pontuais (de 702 para 1055; e 543 para 894 dados, para as profundidades de 1 e 10 m, respectivamente), permitiu completar os dados de 2018, eliminando a quebra da linha temporal no mês de fevereiro, para a profundidade de 1 m. Isso não quer dizer que não há nenhum dado para esse período, e sim que esses são tão poucos, a ponto de não conseguir realizar análises estatísticas significativas. No item (d) nota-se uma grande proximidade entre as linhas de temperatura in situ (respectivas profundidades) com as de satélite nas médias mensais.

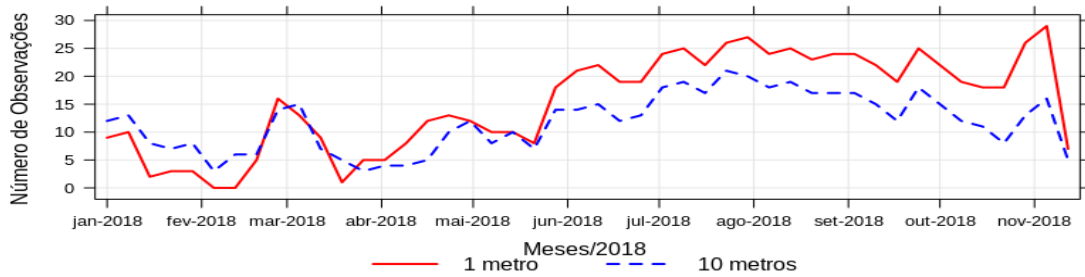
Estes resultados sugerem que no caso do Atlântico Tropical, que sofre bastante influência de cobertura de nuvens, principalmente nos meses de verão devido à atuação da ZCIT, o aumento da janela de busca para 5 x 5 pixel para a comparação da TSM pareceu razoável, já que o gradiente horizontal da TSM não é tão acentuado, como

em outras regiões (analisadas previamente).

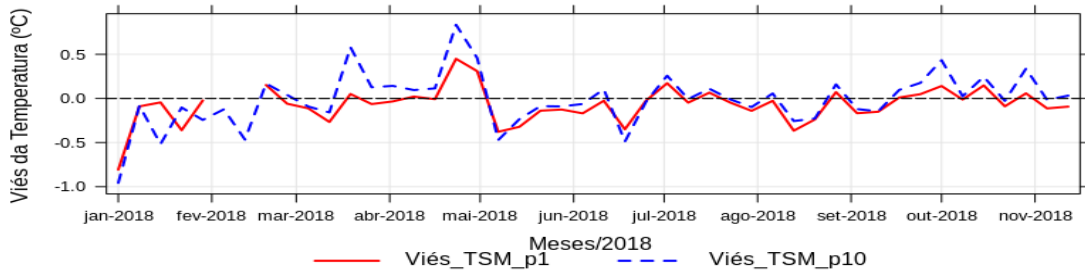
Figura 4.10 - Médias para o ano de 2018 (dado pontual) do PIRATA com nível de qualidade 3-5 (juntos) nas profundidades de 1 e 10 m, sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) desvio padrão semanal, b) frequência semanal, c) viés semanal e d) média mensal da temperatura



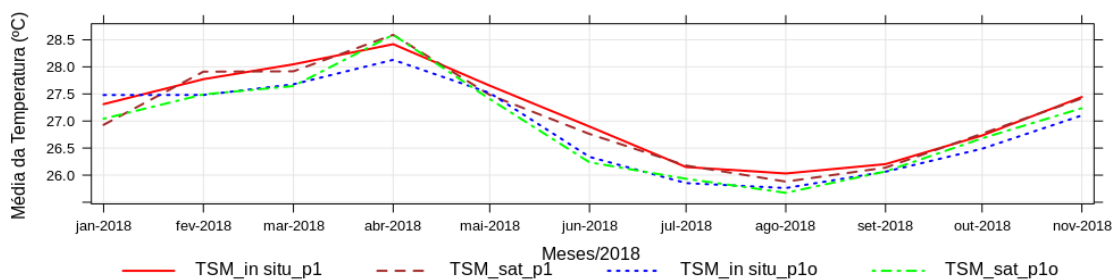
(a)



(b)



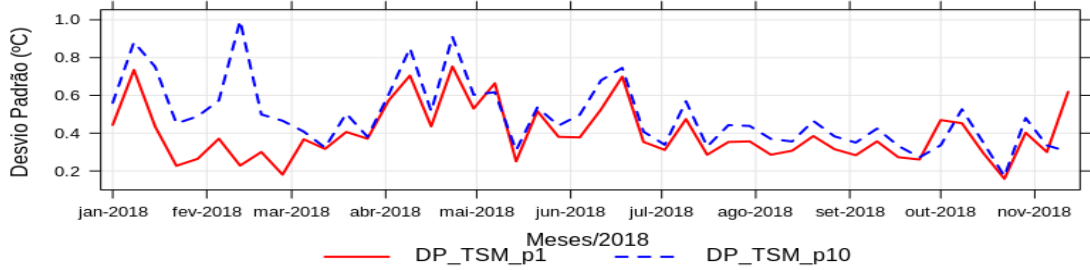
(c)



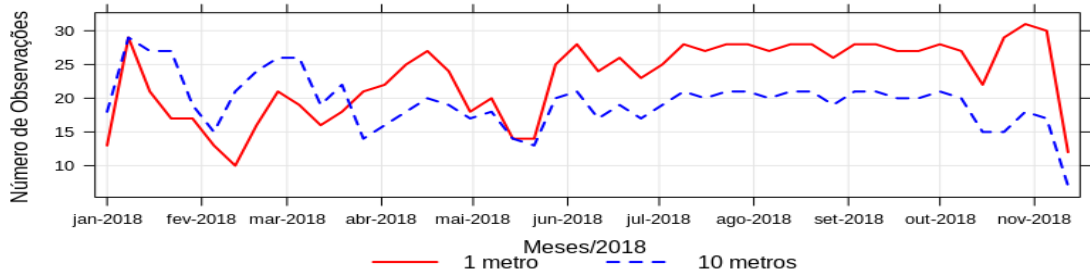
(d)

Fonte: Produção da Autora.

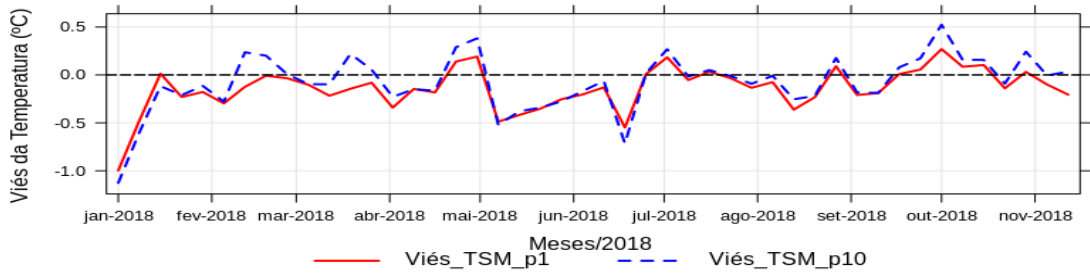
Figura 4.11 - Médias para o ano de 2018 (janela de 5x5 pixel) do PIRATA com nível de qualidade 3-5 (juntos) nas profundidades de 1 e 10 m, sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) desvio padrão semanal, b) frequência semanal, c) viés semanal e d) média mensal da temperatura



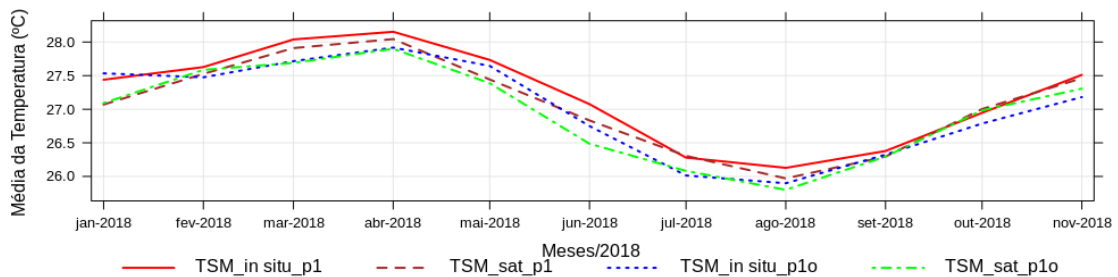
(a)



(b)



(c)

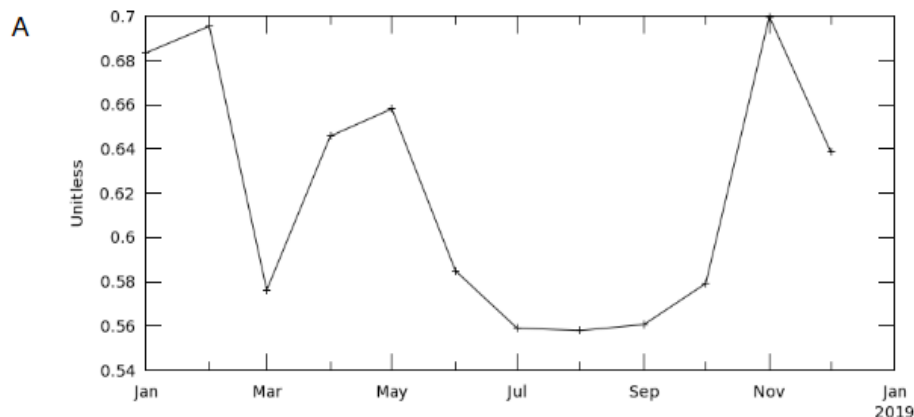


(d)

Fonte: Produção da Autora.

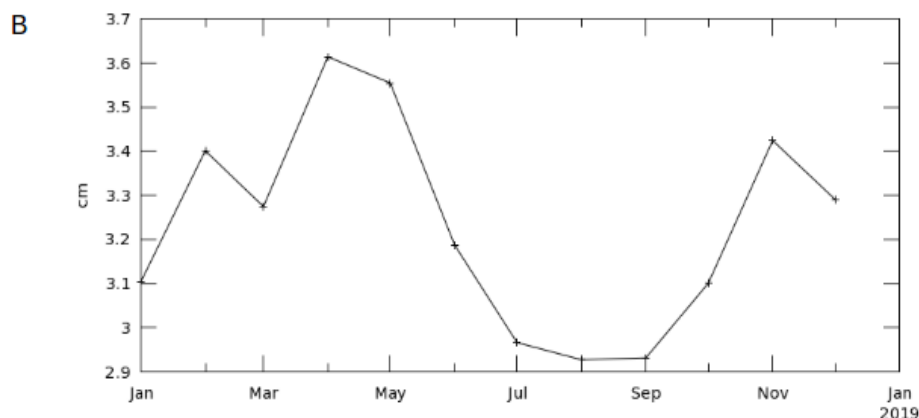
Figura 4.12 - a) Fração cobertura de nuvens MODIS-Terra, e b) Vapor d'água precipitável integrado na atmosfera MODIS-Terra, de Janeiro a Dezembro 2018 na região amostrada pelas boias PIRATA (10°N-20°S; 20-40°O). Séries geradas pelo aplicativo giovanni.nasa.

Time Series, Area-Averaged of Cloud Fraction from Cloud Mask (count of lowest 2 clear sky confidence levels, cloudy & probably cloudy / total count) Day: Mean of Daily Mean monthly 1 deg. [MODIS-Terra MOD08\_M3 v6.1] over 2018-Jan - 2018-Dec, Region 40W, 20S, 20W, 10N



- The user-selected region was defined by 40W, 20S, 20W, 10N. The data grid also limits the analyzable region to the following bounding points: 39.5W, 19.5S, 20.5W, 9.5N. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetted granules that went into making this visualization result.

Time Series, Area-Averaged of Precipitable Water Vapor (IR Retrieval) Total Column: Mean of Level-3 QA Weighted Mean monthly 1 deg. [MODIS-Terra MOD08\_M3 v6.1] cm over 2018-Jan - 2018-Dec, Region 40W, 20S, 20W, 10N



- The user-selected region was defined by 40W, 20S, 20W, 10N. The data grid also limits the analyzable region to the following bounding points: 39.5W, 19.5S, 20.5W, 9.5N. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetted granules that went into making this visualization result.

Fonte: National Aeronautics and Space Administration (2020a).

Na análise de dispersão (Figura 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16) da TSM para os dados pontuais e de janela de 5x5 pixel, observamos uma correlação positiva entre a TSM de satélite e in situ, com  $R^2$  de 0,90 (Tabelas 4.12 e 4.13). Quando comparado todo ano de 2018, em ambas profundidades, a profundidade de 1 m tem valores de  $R^2$  ligeiramente mais altos, seja para dado pontual ou janela de 5x5 pixel. Analisando por estação do ano, o pior valor de  $R^2$  e coeficiente angular (inclinação da reta) foram nas estações do verão ( $R^2$ , 0,47) e outono ( $R^2$ , 0,68), devido principalmente,

a baixa quantidade de dados para estas estações do ano (com alta cobertura de nuvens). Além de que, nestas estações a elevada cobertura de nuvens e conteúdo de vapor d'água atmosférico, prejudica o desempenho do algoritmo de TSM por satélite, como discutido anteriormente.

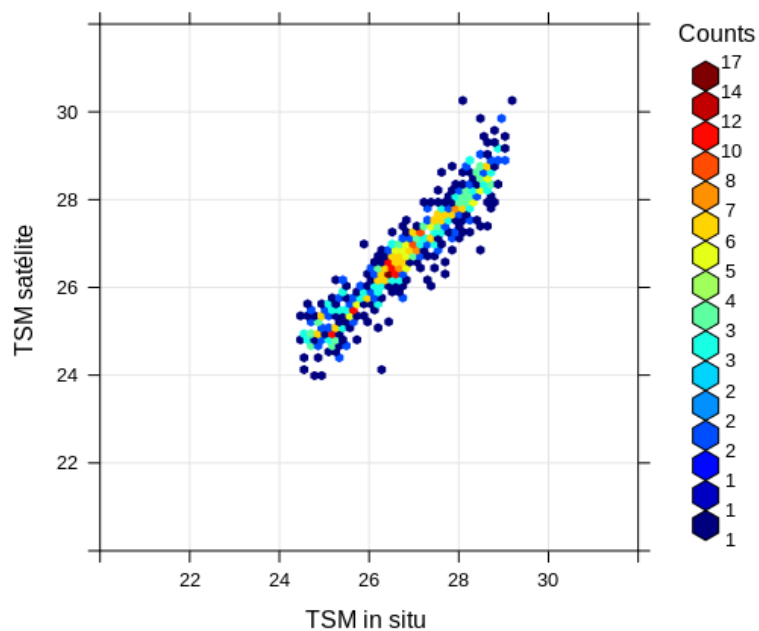
Tabela 4.12 - Estatística de dispersão da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PIRATA de profundidade de 1 m, sem controle de qualidade por intensidade do vento, para dado pontual e janela de 5x5 pixel, por nível de qualidade (NQ) 3-5 (juntos), para todo ano de 2018 e por estação do ano. Dados apresentado por: Coeficiente Angular e  $R^2$ .

	<b>Dado Pontual</b>		<b>janela de 5x5 pixel</b>	
	Coef. Angular	$R^2$	Coef. Angular	$R^2$
2018	0,97	0,90	0,95	0,84
Primavera	0,97	0,93	1,00	0,91
Verão	1,30	0,47	1,00	0,23
Outono	1,10	0,68	0,96	0,51
Inverno	0,93	0,87	0,90	0,85

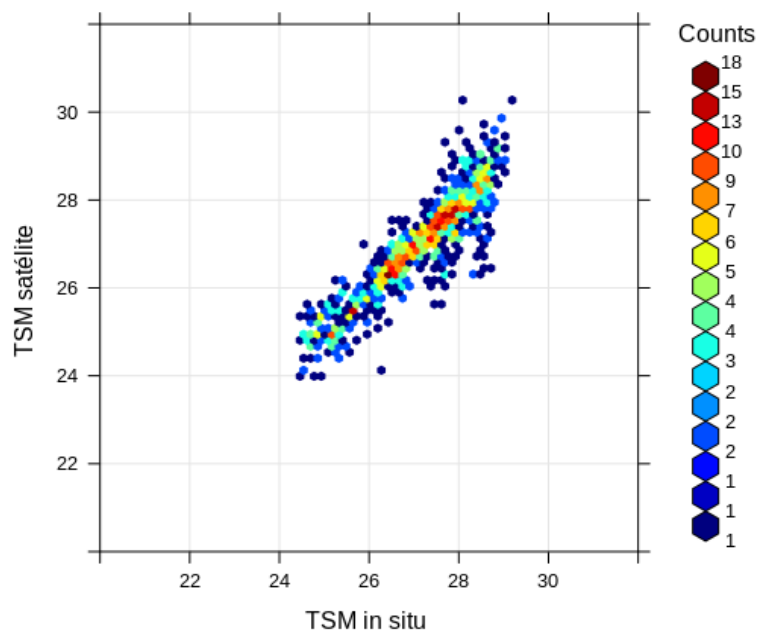
Tabela 4.13 - Estatística de dispersão da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PIRATA de profundidade de 10 m, sem controle de qualidade por intensidade do vento, para dado pontual e janela de 5x5 pixel, por nível de qualidade (NQ) 3-5 (juntos), para todo ano de 2018 e por estação do ano. Dados apresentado por: Coeficiente Angular e  $R^2$ .

	<b>Dado Pontual</b>		<b>janela de 5x5 pixel</b>	
	Coef. Angular	$R^2$	Coef. Angular	$R^2$
2018	0,95	0,83	0,92	0,76
Primavera	0,97	0,91	0,91	0,91
Verão	0,59	0,11	0,51	0,045
Outono	1,20	0,60	0,92	0,40
Inverno	0,89	0,81	0,85	0,80

Figura 4.13 - Dispersão (profundidade de 1 m) para o ano de 2018 do PIRATA com nível de qualidade 3-5 (juntos), sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) dados pontuais e b) janela de 5x5 pixel.



(a)

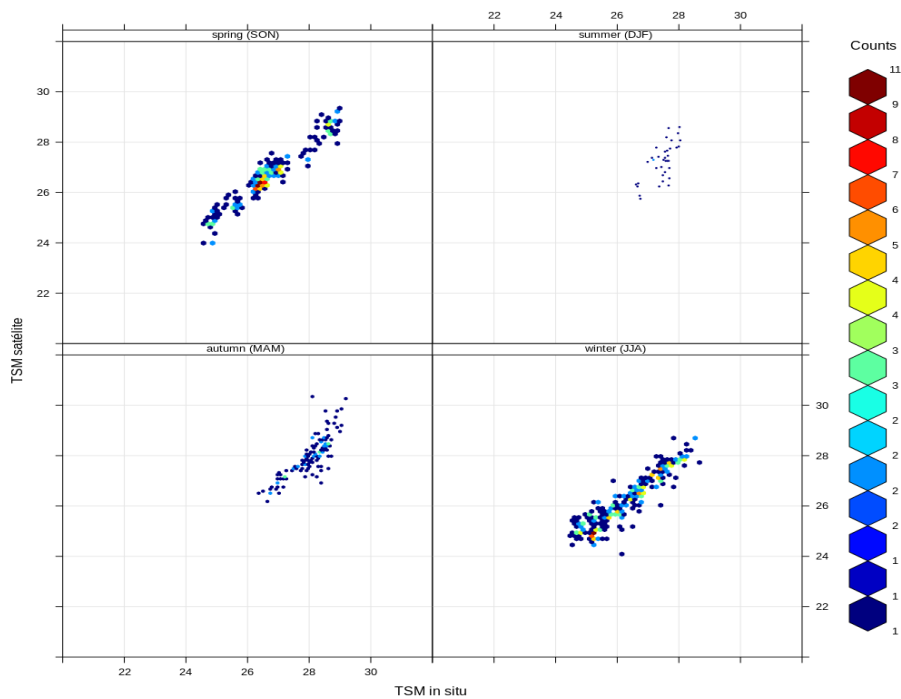


(b)

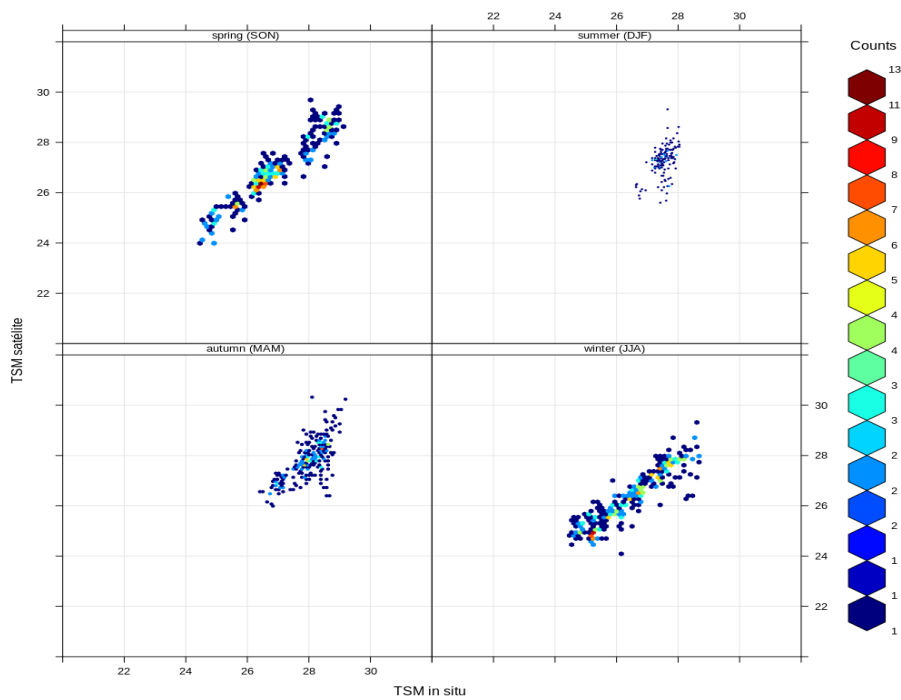
Fonte: Produção da Autora.



Figura 4.14 - Dispersão (profundidade de 1 m) por estações de 2018 do PIRATA com nível de qualidade 3-5 (juntos), sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) dado pontual e b) janela de 5x5 pixel.



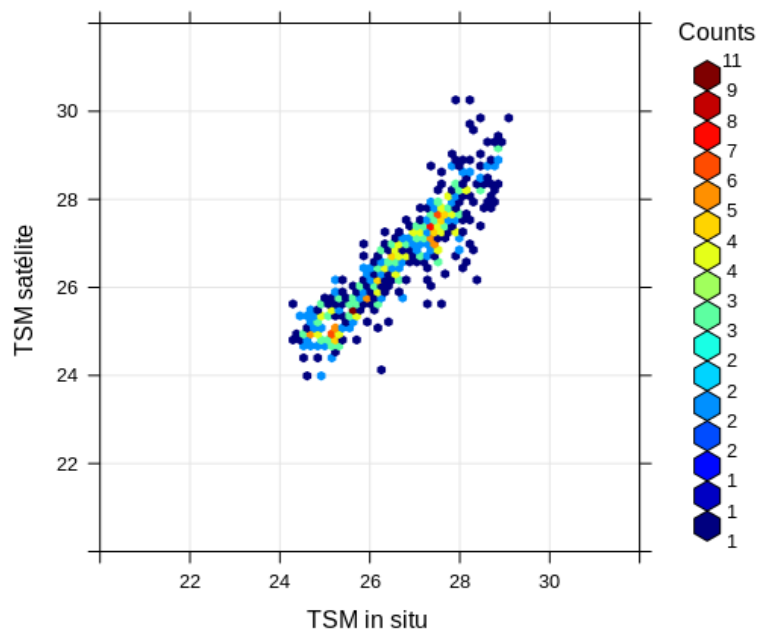
(a)



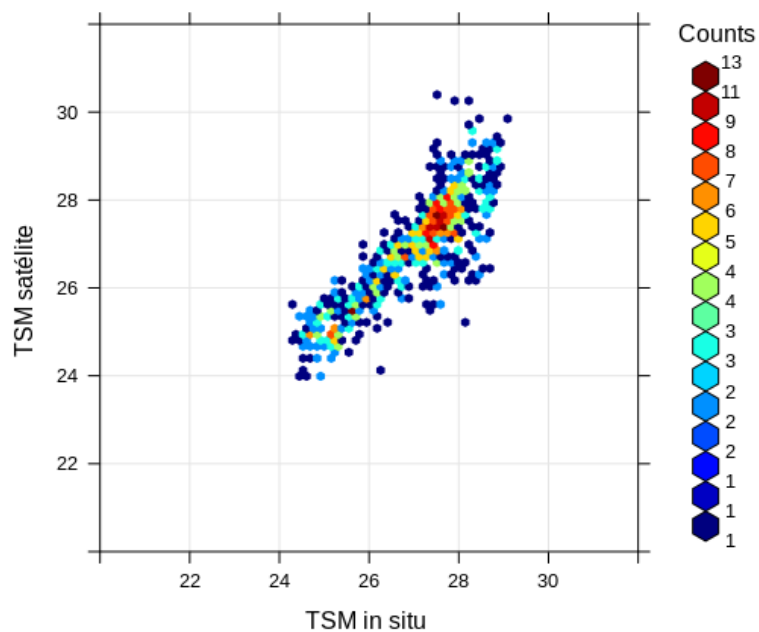
(b)

Fonte: Produção da Autora.

Figura 4.15 - Dispersão (profundidade de 10 m) para o ano de 2018 do PIRATA com nível de qualidade 3-5 (juntos), sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) dado pontual e b) janela de 5x5 pixel.



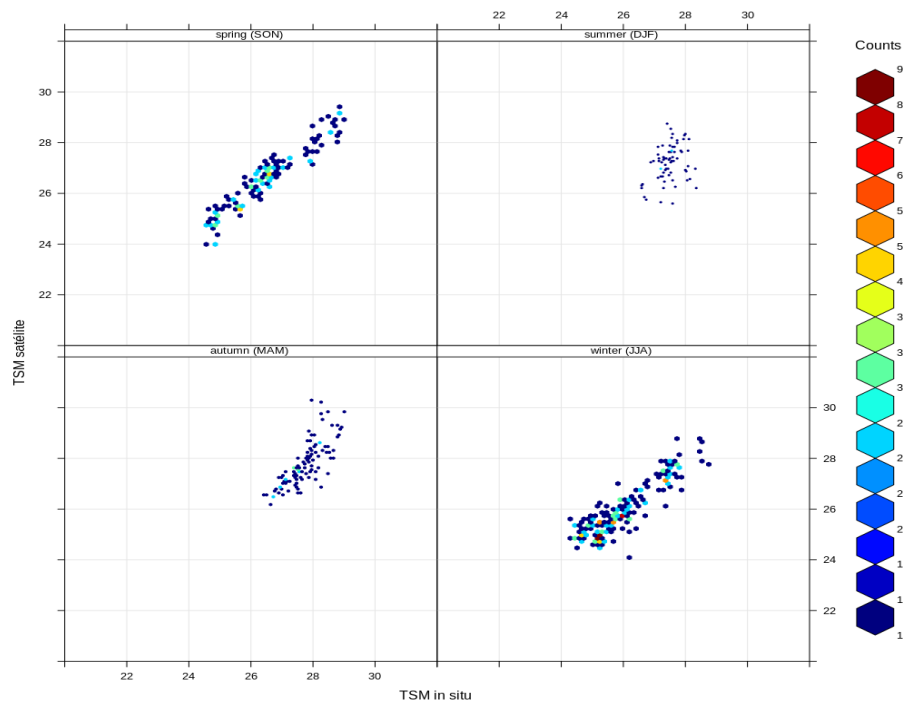
(a)



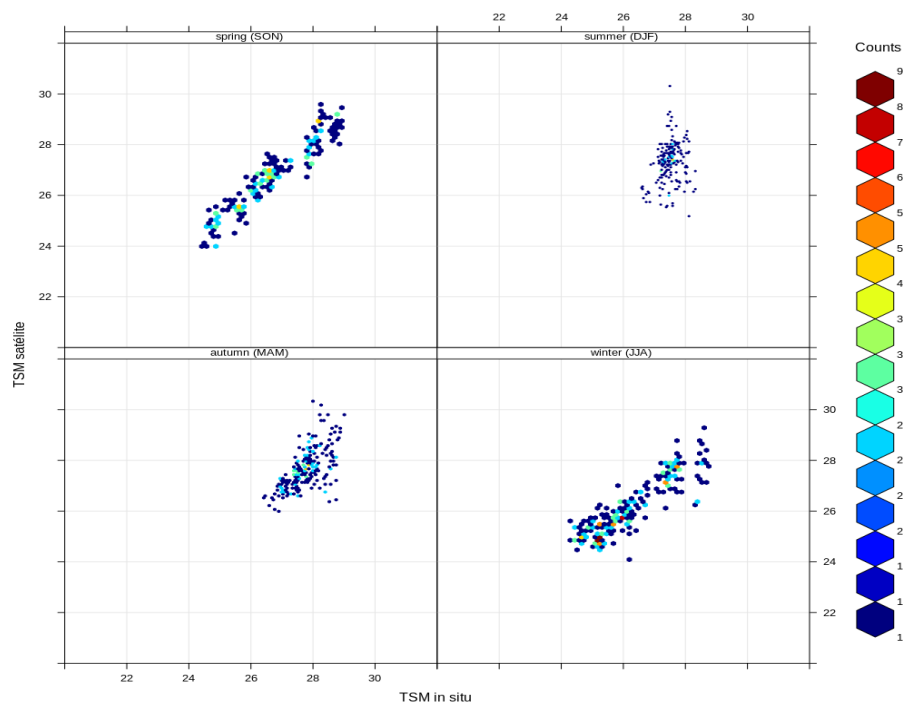
(b)

Fonte: Produção da Autora.

Figura 4.16 - Dispersão (profundidade de 10 m) por estações de 2018 do PIRATA com nível de qualidade 3-5 (juntos), sem controle de qualidade por intensidade do vento em: a) dado pontual e b) janela de 5x5 pixel.



(a)



(b)

Fonte: Produção da Autora.

Trabalhos como Donlon et al. (2002), Donlon et al. (2012), Kent e Taylor (2006), Assireu et al. (2011) demonstram a importância do controle de qualidade dos dados em relação à intensidade do vento para estes exercícios de comparação da TSM satélite e in situ. O PIRATA disponibiliza os dados de vento, ainda que muitos desses dados estejam faltando. Realizando o controle de qualidade por intensidade do vento ( $\geq 6$  m/s), a redução dos dados é gigantesca - dado pontual: de 702 para 223, e 543 para 153 nas profundidades de 1 e 10 m, respectivamente. As estatísticas para todo ano de 2018 podem ser visualizadas na Tabela 4.14. Para a profundidade de 1 m, houve uma sutil diminuição do EMQ e  $EA_x$ , entretanto, o mesmo não ocorre na profundidade de 10 m. Deve-se lembrar que a quantidade de dados é bem menor ao ser eliminado pelo controle de qualidade pela intensidade ( $\geq 6$  m/s) do vento. O que pode ser observado é que mesmo o EMQ sendo um pouco maior para a comparação da TSM satélite com a TSM in situ à 10 m, o viés (-0,060 °C) foi muito próximo com o in situ ao de 1 m (-0,054 °C). Isso demonstra como que controle de qualidade dos dados em função do vento é importante para reduzir as diferenças entre a TSM satélite e in situ em função da estratificação termal diurna.

Tabela 4.14 - Estatística da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PIRATA para dado pontual, de nível de qualidade (NQ) 3-5 (juntos), eliminando dados com ventos de intensidade menor que 6 m/s, nas profundidades de 1 e 10 m: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ).

	Profundidade 1 m				Profundidade 10 m			
	N	EMQ	Viés	$EA_x$	N	EMQ	Viés	$EA_x$
Dado Pontual	223	0,382	-0,054	0,264	153	0,528	-0,060	0,388

Quando separa-se esse controle de qualidade por nível de qualidade (Tabela 4.15), há uma diminuição do EMQ e  $EA_x$  nos casos de profundidade de 1 m, mas a falta de dados também deixa falhas nas análises: sem informação para o nível de qualidade 5 da profundidade de 10 m. Entretanto, essa metodologia, de certa forma, apresentou melhores dados e assegura melhor qualidade dos dados. Mas, caso essa informação não esteja disponível, a utilização de todos os níveis de qualidade recomendados (3-5) ainda sim certifica dados bons.

Tabela 4.15 - Estatística da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PIRATA para dado pontual, de nível de qualidade (NQ) 3-5 (separado), eliminando dados com ventos de intensidade menor que 6 m/s, nas profundidades de 1 e 10 m: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ).

NQ	Profundidade 1 m				Profundidade 10 m			
	N	EMQ	Viés	$EA_x$	N	EMQ	Viés	$EA_x$
5	15	0,116	-0,027	0,092	-	-	-	-
4	84	0,288	-0,010	0,227	43	0,398	0,086	0,337
3	124	0,452	-0,087	0,310	109	0,574	-0,118	0,412

As séries temporais de estatísticas semanal dos dados pontuais com controle de qualidade pela intensidade do vento são apresentadas na Figura 4.17 para os níveis de qualidade 3-5 (juntos) e média mensal, com diversos dias sem dados (em destaque o período de janeiro a meados de maio). O DP (quando tem-se) exibe valores relativamente baixos, exceto para a profundidade de 10 m nos meses de janeiro e fevereiro (meses com menor quantidade de dados). O mesmo pode ser percebido no item (c), com viés negativo (exceto para NQ 4 de prof. de 10 m) e picos entre janeiro e março e em junho (prof. 10 m).

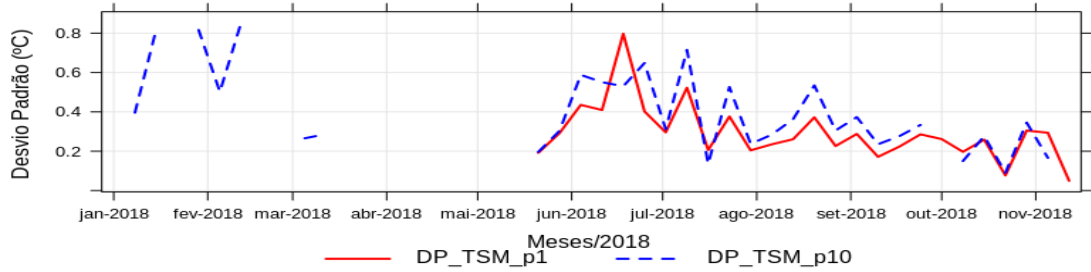
Na análise de dispersão da TSM (Figura 4.18 e 4.19) para os dados pontuais, observamos uma correlação positiva entre a TSM de satélite e in situ, com o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) maior para profundidade de 1 m (Tabelas 4.16), mas com valores altos comparando todo ano de 2018, em ambas profundidades. Analisando por estação do ano, o pior valor de  $R^2$  e coeficiente angular encontra-se com as estações do verão, devido principalmente, a baixa quantidade de dados. Entretanto, as estações de outono (prof. 1 m) e inverno (prof. 10 m) evidenciou valores melhores do que o anual.

Tabela 4.16 - Estatística de dispersão da diferença entre as medidas de TSM satélite e boias do PIRATA de profundidade de 1 e 10 m, vento com intensidade maior ou igual a 6 m/s, para dado pontual no nível de qualidade (NQ) 3-5 (juntos), para todo ano de 2018 e por estação do ano. Dados apresentado por: Coeficiente Angular e  $R^2$ .

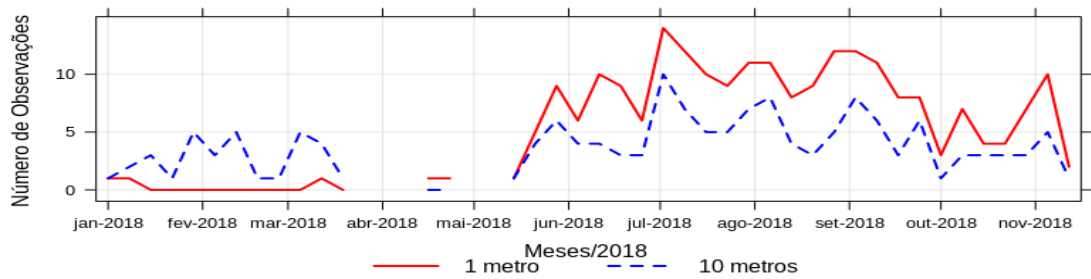
	<b>Profundidade 1 m</b>		<b>Profundidade 10 m</b>	
	Coef. Angular	$R^2$	Coef. Angular	$R^2$
2018	0,84	0,82	0,77	0,72
Primavera	0,87	0,77	0,78	0,76
Verão	-	-	0,27	0,014
Outono	0,82	0,93	0,75	0,64
Inverno	0,85	0,83	0,80	0,79

A dispersão nos dados de TSM satélite vs. in situ mesmo após o controle de qualidade dos dados por intensidade do vento ( $> 6$  m/s) revela como que alguns fatores indesejáveis ainda atuam no desempenho do algoritmo para o Atlântico Tropical. Alguns desses fatores podem ser a interferência de nuvens (sub-pixel e nuvens finas), condições extremas de vapor d'água sub-representadas pelo modelo não-linear e eventualmente aerossóis provindos do continente Africano que atravessam o Oceano Atlântico transportados pelos ventos alísios i.e., poeira desértica e fumaça de queimadas (Figura 4.20) (EUMETSAT OSI SAF MANUAL, 2018). Vieses regionais e sazonais do algoritmo de regressão, gerados principalmente por condições extremas de vapor d'água (muito úmido ou muito seco) são bem conhecidos e reportados em diversos trabalhos (PETRENKO et al., 2019; DONLON et al., 2012; PICART; MARSOUIN, 2018). O algoritmo de TSM ABI GOES-16 gerado pelo grupo OSI SAF aplica uma correção de viés que deveria corrigir ao menos em parte este problema, mas a correção não é perfeita. Em relação aos aerossóis, este é um problema mais complexo pois não é efetivamente tratado no algoritmo. O grupo OSI SAF utiliza uma máscara de nuvens (NWC) e controle de qualidade que busca identificar a presença de aerossóis de poeira do Saara, e tratá-lo. Mas a fumaça de queimadas pode ser tão problemática quanto e não é tratada. Estas podem ser as principais fontes de erro na estimativa da TSM por satélite para o Atlântico Tropical.

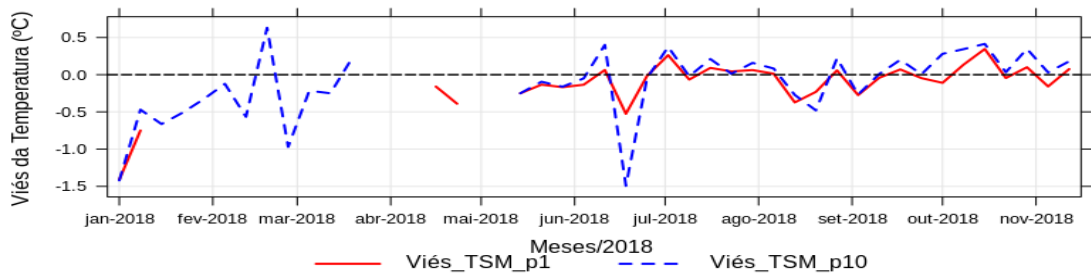
Figura 4.17 - Médias para o ano de 2018 (dado pontual) do PIRATA com nível de qualidade 3-5 (juntos) nas profundidades de 1 e 10 m, ventos com intensidade maior ou igual a 6 m/s em: a) desvio padrão semanal, b) frequência semanal, c) viés semanal e d) média mensal da temperatura



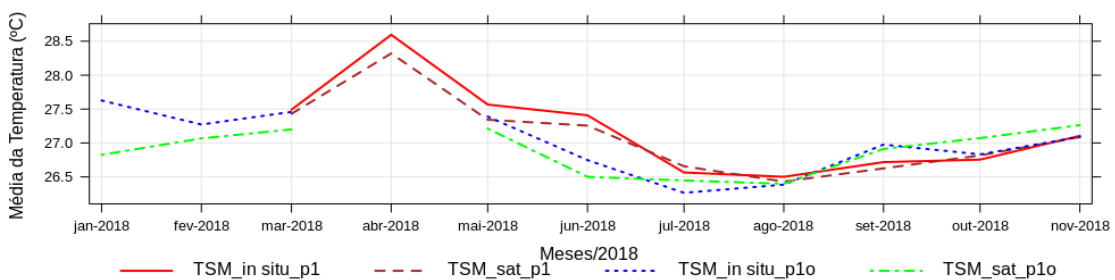
(a)



(b)



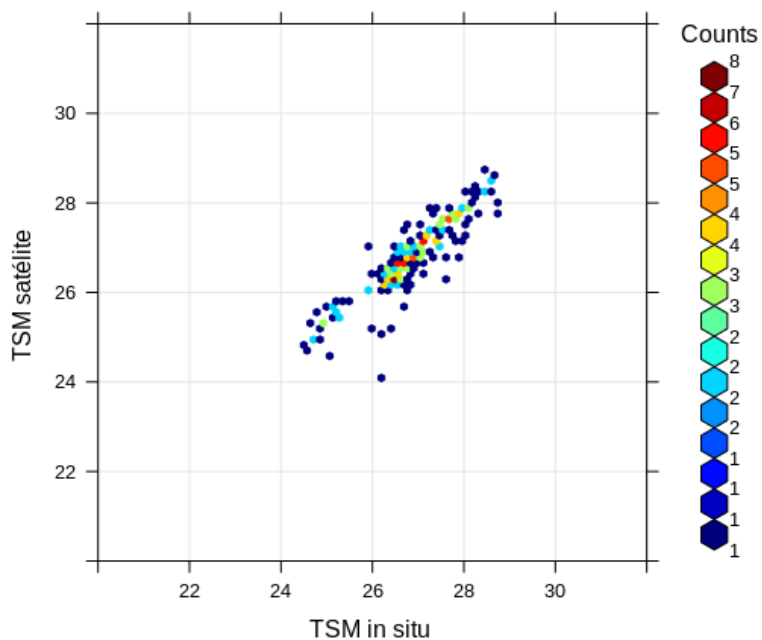
(c)



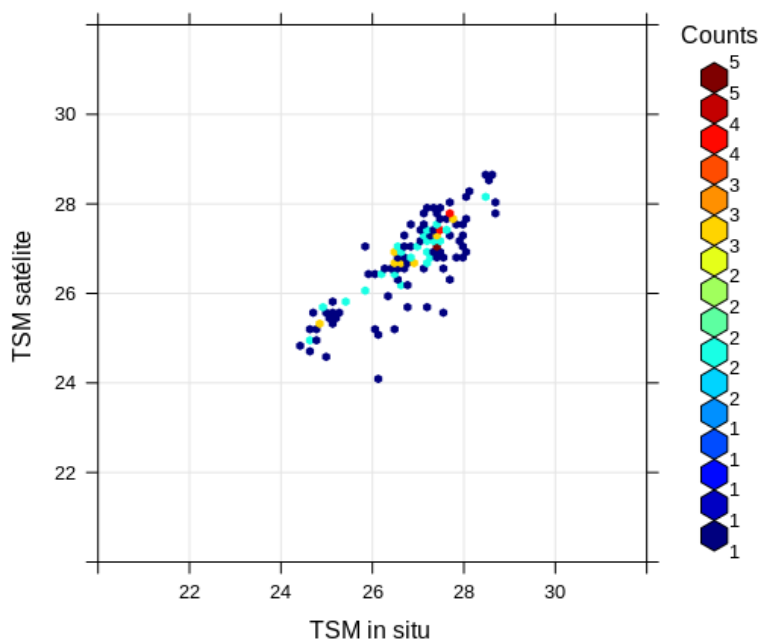
(d)

Fonte: Produção da Autora.

Figura 4.18 - Dispersão (profundidade de 1 e 10 m) para o ano de 2018 do PIRATA com nível de qualidade 3-5 (juntos), ventos com intensidade maior ou igual a 6 m/s em: a) todo ano, dado pontual com profundidade de 1 m e b) todo ano, dado pontual com profundidade de 10 m.



(a)

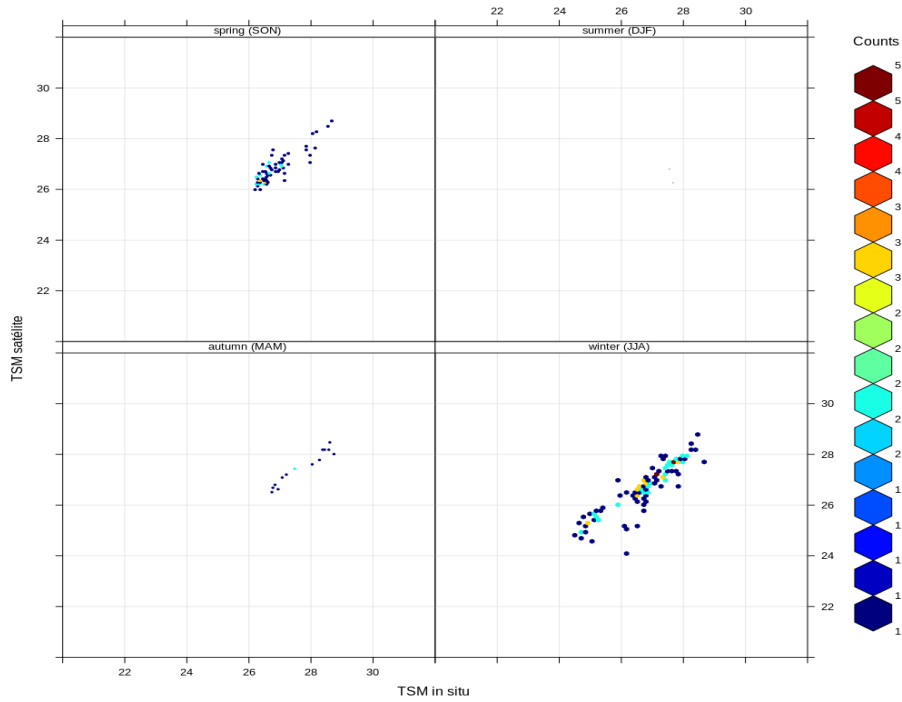


(b)

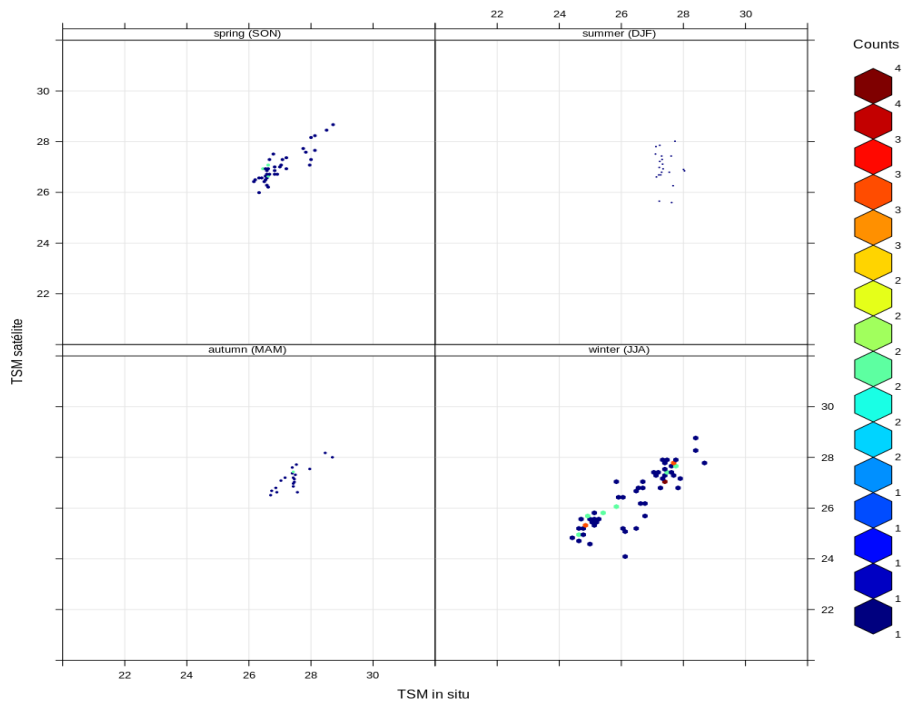
Fonte: Produção da Autora.



Figura 4.19 - Dispersão (profundidade de 1 e 10 m) por estação de 2018 do PIRATA com nível de qualidade 3-5 (juntos), ventos com intensidade maior ou igual a 6 m/s em: a) por estação, dado pontual com profundidade de 1 m e b) por estação, dado pontual com profundidade de 10 m.



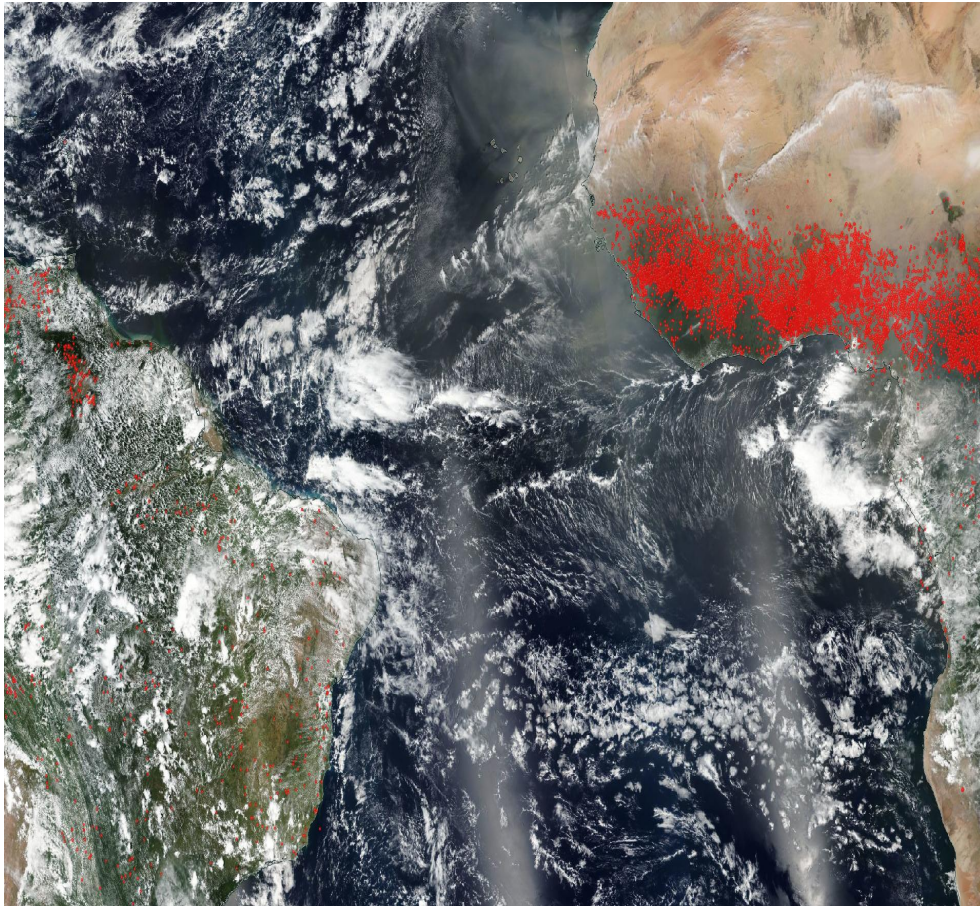
(a)



(b)

Fonte: Produção da Autora.

Figura 4.20 - Imagem RGB cor verdadeira do sensor VIIRS (SNPP) do dia 22 de janeiro 2018, mostrando a poeira desértica e a fumaça das queimadas do continente Africano que atravessa o Atlântico Tropical. O focos quentes de incêndio identificados com o mesmo sensor, estão destacados em vermelho. Imagem extraída do aplicativo worldview.nasa.



Fonte: National Aeronautics and Space Administration (2020b).

## 4.2 Análise entre os produtos L3 vs L4

Nessa segunda etapa da validação dos dados de TSM, o produto do ABI-GOES-16 é comparado com dois produtos de satélite L4: OSTIA e Geo-Polar Blended. Como os resultados obtidos na comparação entre ABI-GOES-16/OSTIA e ABI-GOES-16/Geo-Polar Blended são praticamente idênticos, apenas os resultados e imagens geradas da análise entre ABI-GOES-16 e OSTIA serão apresentadas, evitando repetição. Diferente da etapa anterior, apenas a análise de viés médio foi realizada para todos os casos, expostos em mapas separados por mês e por estação do ano. Esse viés é gerado pela média dos produtos mensais ou trimestrais, de ambos produtos,

subtraindo os produtos OSTIA menos ABI-GOES-16 (L4 - L3).

Assim, foi gerado dois grupos de análise, utilizando apenas os níveis de qualidade 3-5: *a)* todos os dados do produto ABI-GOES-16 e *b)* utilizando os dados noturnos e apenas dados diurnos com vento de intensidade  $\geq 6$  m/s para gerar a média diária TSM ABI.

#### 4.2.1 TSM ABI-GOES-16 vs OSTIA

Análises mensais para a diferença de TSM do ABI-GOES-16 com OSTIA pode ser observada na Figura 4.21, para todos os dados de nível de qualidade 3-5 e na Figura 4.22, incluindo apenas vento diurnos de intensidade  $\geq 6$  m/s.

Na Figura 4.21, diversas observações podem ser consideradas, uma delas é em relação ao gradiente de temperatura. O destaque fica para a Região da Confluência Brasil-Malvinas (CBM), região de encontro entre as águas quentes que são trazidas do Norte pela Corrente do Brasil (CB) e frias do sul pela Corrente das Malvinas (CM) (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2018; PEZZI et al., 2005). Para a região da CBM (e de forma mais ampla, para toda região entre 30°S a 45°S), nota-se um viés de temperatura positivo (alcançando até 2 °C positivo) nos meses de maio a novembro, indicando estimativas de TSM mais fria do produto ABI-GOES-16 em relação ao OSTIA, para essa região. Em contrapartida, nos meses de fevereiro e março, esse viés mostrou-se negativo. Picart e Marsouin (2018) verificaram, para a mesma região durante o mês de maio, maiores valores de DP do que qualquer outra região de estudo amostrada pelo GOES-16, e viés relativamente alto, melhor apenas do que as bordas. O alto valor do viés nas bordas também foi identificado no trabalho de Picart e Marsouin (2018).

Para a região ao norte da área de estudo, no Atlântico Tropical, entre 10°N e 0°, destaca-se um viés mais negativo, e ocasionalmente mais positivo para os meses de janeiro, novembro e dezembro. Este viés pode estar relacionado à fatores já discutidos anteriormente, que atuam nessa região, como: a banda de nebulosidade da ZCIT, alto vapor d'água e aerossóis, incluindo poeira do Saara e fumaça de queimadas do continente Africano. A região central do Oceano Atlântico Sul (0° a 30°S) distingue-se com viés mais baixo do que até então discutido, com característica maioritariamente negativa. Picart e Marsouin (2018) também registraram menores valores de DP e viés nessa região. Apenas no mês de Janeiro é possível observar uma "banda" de viés negativo no meio do Oceano Atlântico, que pode ser relacionado à presença persistente da ZCAS.

Na Figuras 4.22 são apresentadas as médias mensais obtidas apenas com os dados com ventos de intensidade  $\geq 6$  m/s. De forma geral, é possível observar uma redução tanto dos vieses positivos como negativos em toda a região e meses do ano. Regiões de maior gradiente horizontal da TSM, no entanto, continuam apresentando os maiores vieses, sendo que a TSM tende a ter um viés mais positivo na CBM, com o OSTIA com maiores temperaturas que o ABI-GOES-16 nessa região.

Figura 4.21 - ABI-GOES-16 - OSTIA - Meses de 2018, Nível de Qualidade 3-5

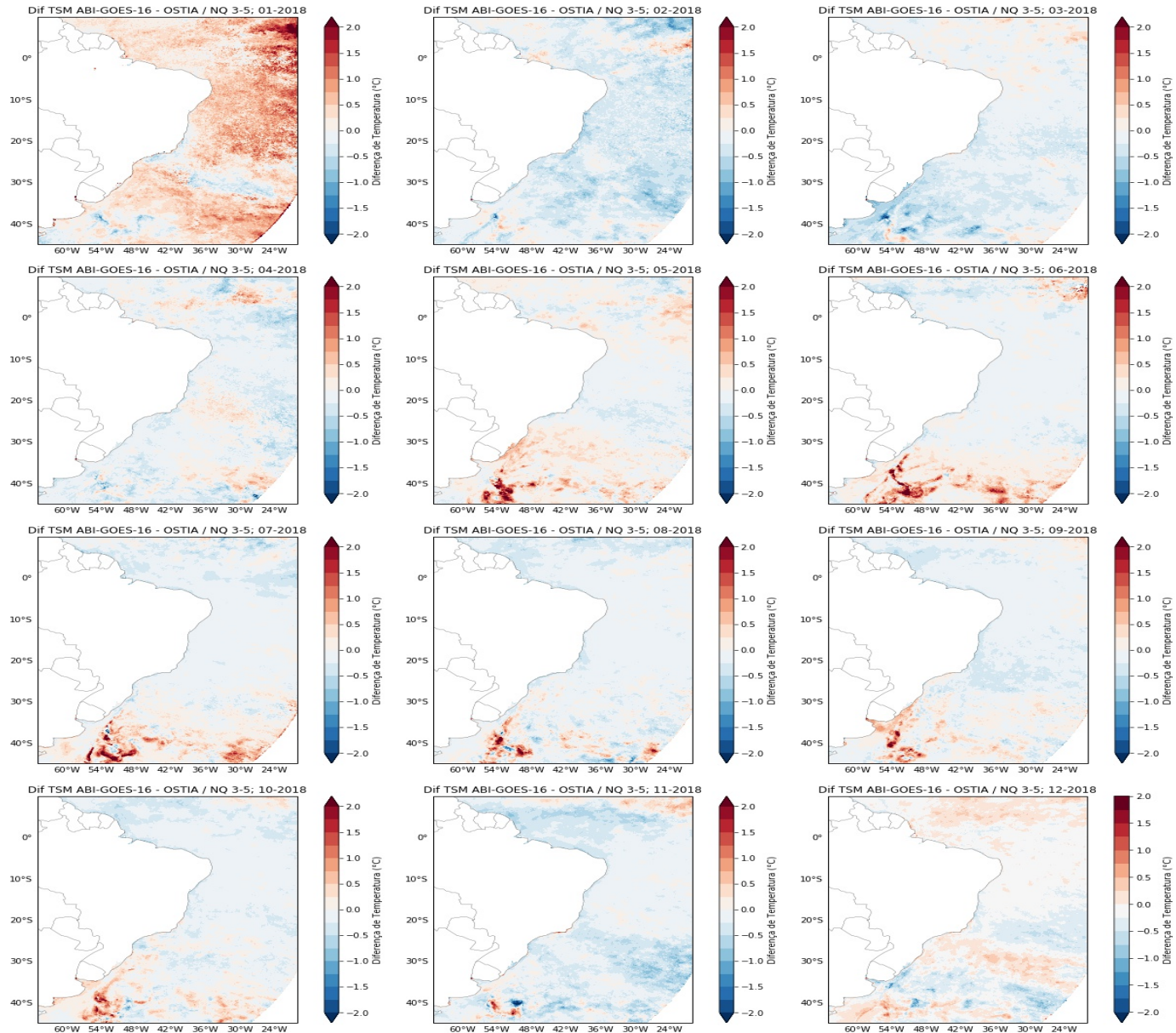
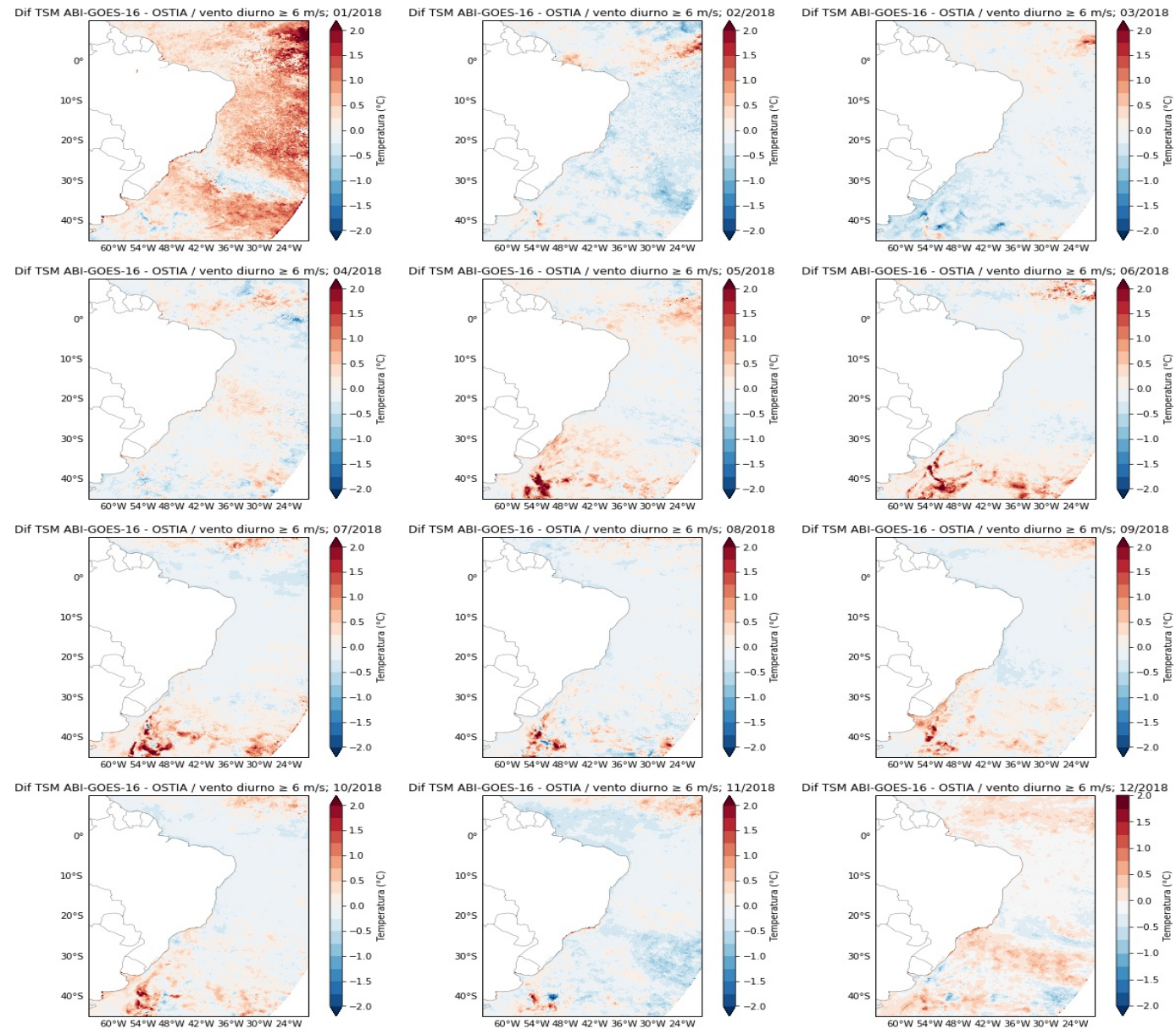


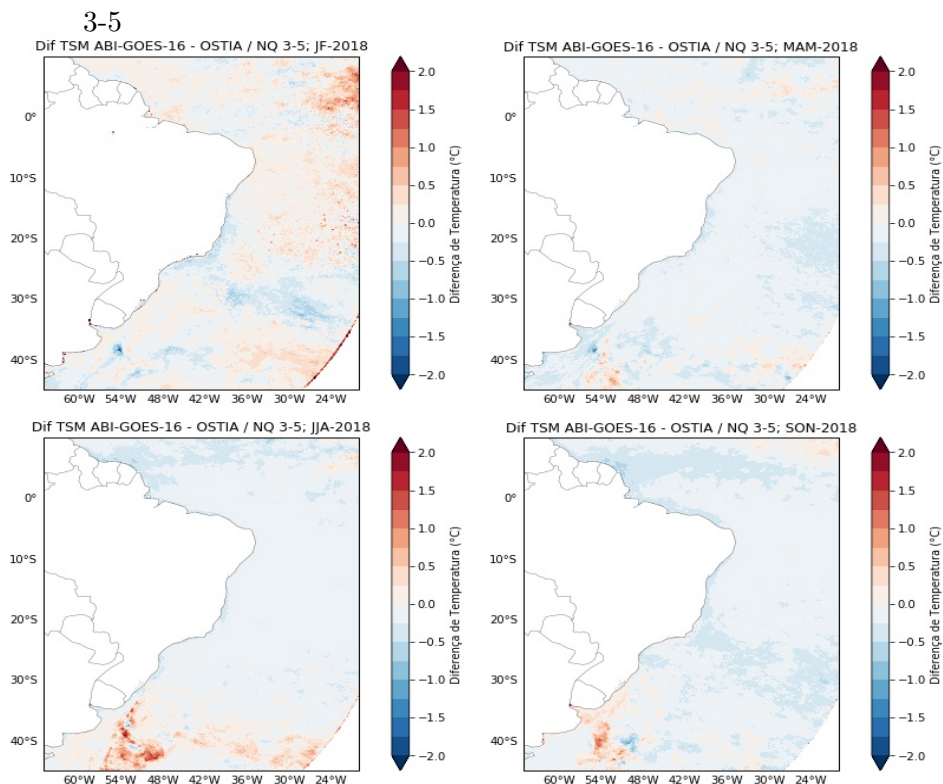
Figura 4.22 - ABI-GOES-16 - OSTIA - Meses de 2018, ventos diurnos com intensidade maior ou igual a 6 m/s



Fonte: Produção da Autora.

A comparação por estação do ano com técnica de controle de qualidade por nível de qualidade (Figura 4.23) expõem algumas características em comum com a análise por mês: o verão e inverno apresentaram as maiores diferenças, sendo que as regiões com maior vieses foram nas áreas a) com maior gradiente horizontal da TSM, i.e., CBM; b) com cobertura persistente de nuvens, i.e., ZCIT e ZCAS; e c) com influência de aerossóis da África (Atlântico Tropical). Para as regiões com assinatura de ZCAS e ZCIT, o viés foi predominantemente negativo, indicando uma TSM ABI mais quente. Para a CBM o viés foi positivo principalmente no inverno com a TSM ABI mais fria. Para a região com assinatura de aerossóis da África, o viés foi positivo (no verão: JF) com a TSM ABI mais fria, o que também foi encontrado por Picart e Marsouin (2018). Estes autores encontraram um viés negativo na região de influência dos aerossóis da África e discutiram que a poeira do deserto absorve radiação em  $10,3 \mu\text{m}$ , diminuindo a TB, e subestimando a TSM. No caso do presente trabalho, além da poeira desértica, a fumaça provinda de focos ativos de queimadas também estavam presentes nesta região do Atlântico Tropical no início de 2018 como observado em imagens do sensor VIIRS (Figura 4.20) (não apresentadas aqui), e podem ter ocasionado também a diminuição dos valores de TSM ABI.

Figura 4.23 - ABI-GOES-16 - OSTIA - por estação do ano de 2018, Nível de Qualidade

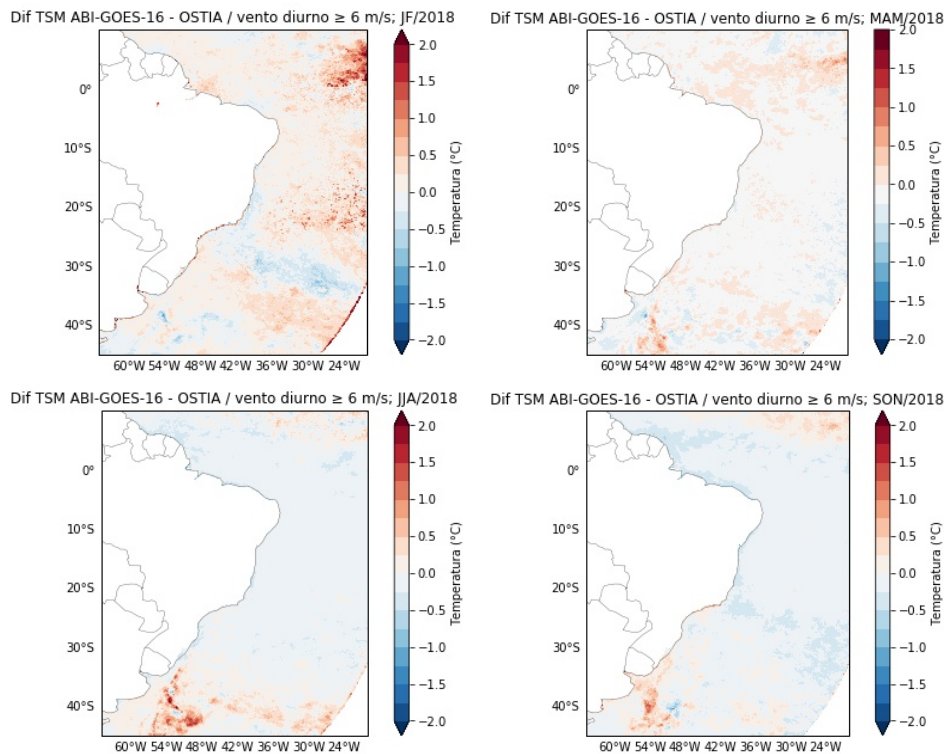


Fonte: Produção da Autora.

A comparação por estação do ano com controle de qualidade por intensidade do vento (Figura 4.24) também expõem algumas características em comum a análise por mês.

No verão, pode destacar-se informações como CBM e a faixa costeira com disposição de gradiente de temperatura positivo. Já no outono o viés tende a ser negativo para quase todo domínio, com exceção em alguns lugares, como CBM e no extremo nordeste da área de estudo. No inverno o viés mantém-se negativo, com exceção abaixo de 30° S (principalmente no CBM) e próximo de 10° N. Tanto o outono como inverno mostrou menor viés, com tendências homogêneas negativas entre 0° a 30° S. E para finalizar, a primavera, ainda com viés pendendo ao negativo, com faixa positiva próximo de 10°N e na região da CBM. Mas de modo geral o que pôde ser notado foi a diminuição geral das diferenças entre os produtos L3 e L4 com os dados de TSM com vento acima de 6 m/s, indicando a redução da influência da estratificação termal diurna, neste caso. Como esperado, o produto L3 é portanto, mais influenciado que o L4 pela estratificação diurna, o que no caso é uma vantagem para o estudo do ciclo diurno usando este produto (PETRENKO et al., 2019).

Figura 4.24 - ABI-GOES-16 - OSTIA - por estação do ano de 2018, ventos com intensidade maior ou igual a 6 m/s

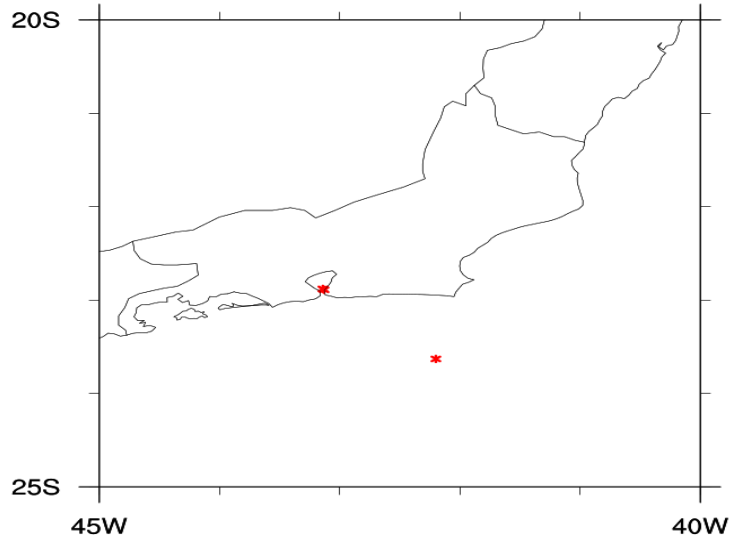


Fonte: Produção da Autora.



Afim de verificar o desempenho dos produtos L3 e L4 e identificar possíveis fontes de erros nas regiões de maiores diferenças, foram feitas algumas comparações da TSM satélite L3 e L4 com dados in situ nas áreas selecionadas. Enfocando na região costeira do Rio de Janeiro, área conhecida pela sua ressurgência comum no verão, caracterizada pela temperatura da água mais fria, e com auxílio das boias fixas do PNBoia (duas de Cabo Frio e uma de Niterói), Figura 4.25, uma investigação mais detalhada foi realizada, comparando a TSM in situ com ABI-GOES-16 e OSTIA. As estatísticas dessa comparação podem ser observadas na Tabela 4.17, com melhores resultados na comparação entre as boias com o produto OSTIA. Algumas observações devem ser levadas em consideração ao defrontar com os dados: primeiramente, a profundidade da estimativa/coleta de TSM do OSTIA à 10 m e das boias in situ à 1 m não coincidem, bem como a TSM ABI-GOES-16 que é um produto de sub-pele ( $\sim 1$  mm). Lembrando que não haviam dados de vento disponíveis para utilizar como controle de qualidade no programa PNBoia. Os altos valores de EMQ ( $> 0,9$  °C) tanto para a TSM OSTIA L4 como para a TSM ABI GOES-16 revelam, no entanto, que além da questão da estratificação diurna, outros fatores como o forte gradiente horizontal, e ainda possivelmente questões de qualidade dos dados in situ, podem ter prejudicado as estatísticas de erro nesta região costeira de Cabo Frio. O viés positivo dos produtos L3 e L4 sugerem ainda que a TSM satélite, tanto de sub-pele (L3) e *foundation* (L4) não consigam mensurar a TSM mais fria da ressurgência costeira, provavelmente por limitações do algoritmo não-linear, com a sub-representatividade dessa área na calibração do algoritmo.

Figura 4.25 - Recorte da área de estudo, para a região do Rio de Janeiro, com destaque em vermelho simbolizando a posição das duas boias de Cabo Frio e uma de Niterói. As duas boias de Cabo Frio encontra-se próximas uma da outra, portanto, seus pontos se sobrepõem.



Fonte: Produção da Autora.

Tabela 4.17 - Estatística da diferença entre as médias diárias de TSM satélite do GOES-16 e OSTIA com duas boias do Cabo Frio e uma de Niterói do PNBoia fixa para dado pontual, de nível de qualidade (NQ) 3-5 (junto), para todo ano de 2018 e Janeiro : quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ).

	ABI-GOES-16				OSTIA			
	N	EMQ	Viés	$EA_x$	N	EMQ	Viés	$EA_x$
2018	204	1,190	0,257	0,895	173	0,906	0,080	0,650
Janeiro	40	1,177	0,583	0,998	43	1,202	0,466	0,945

Estatística similar à região do Rio de Janeiro (Tabela 4.17) foi realizada para a CBM (Tabela 4.18), comparando os produtos de TSM L3 e L4 com o projeto PNBoia de deriva para o quadrante 45°S a 30°S e 60°O a 30°O, Figura 4.26. Conclusões parecidas à análise anterior podem ser citadas: a profundidade da estimativa de TSM L3 e L4 e sua comparação com as boias de deriva; e a baixa quantidade de dados para o inverno (junho, julho e agosto). Resultados melhores são notados na comparação entre as boias e OSTIA, principalmente para o inverno, enquanto o

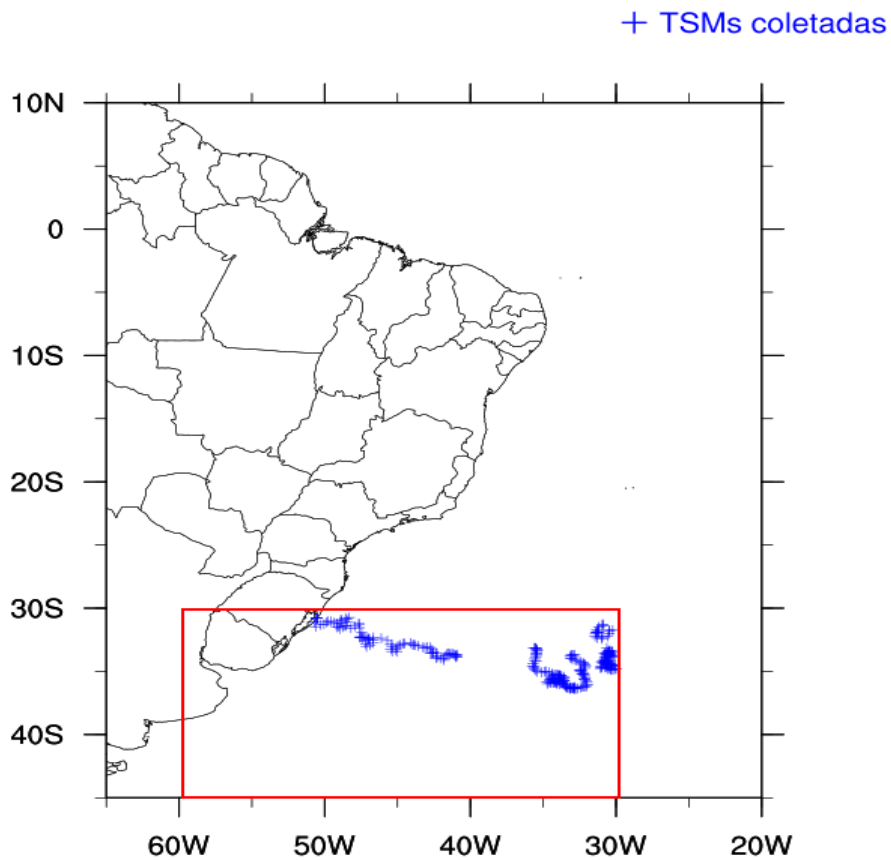
ABI-GOES-16 apresenta pior resultado para a mesma época. Interessante notar que o viés neste caso foi negativo tanto para a TSM L4 OSTIA (-0,096 °C) com a TSM L3 ABI (-0,180 °C). Um fator que poderia explicar em parte o viés negativo é o gradiente vertical da TSM, que no caso da média diária, a TSM sub-pele (ABI) pode ser mais fria que a in situ, devido aos fluxos de calor com a atmosfera. A TSM de fundação (L4) também poderia ser mais fria que a in situ por ser representativa de uma profundidade maior (10m). A forte dinâmica e gradiente horizontal da TSM também devem contribuir para os maiores desvios nessa região altamente complexa.

Isso denota o alto grau de complexidade desta região, com forte dinâmica e gradiente horizontal da TSM. Desvios elevados nessa região são já bem conhecidos e encontrados tanto para os produtos L3 (Picart e Marsouin (2018), Borgne et al. (2011), Borgne et al. (2012)) como o L4 (Donlon et al. (2002)).

Tabela 4.18 - Estatística da diferença entre as médias diárias de TSM satélite do GOES-16 e OSTIA com PNBoia de deriva para dado pontual, de nível de qualidade (NQ) 3-5 (junto), para todo ano de 2018 e inverno, para a região da CBM, definido pela região de 45–30°S e 60–30°O: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ).

	<b>ABI-GOES-16</b>				<b>OSTIA</b>			
	N	EMQ	Viés	$EA_x$	N	EMQ	Viés	$EA_x$
2018	469	0,671	-0,180	0,485	630	0,381	-0,096	0,252
Inverno	18	0,827	-0,573	0,618	20	0,163	-0,020	0,120

Figura 4.26 - Recorte da área de estudo, sinalizado quadrante em vermelho de 45–30°S e 60–30°O, utilizando as boias do PNBoia de deriva

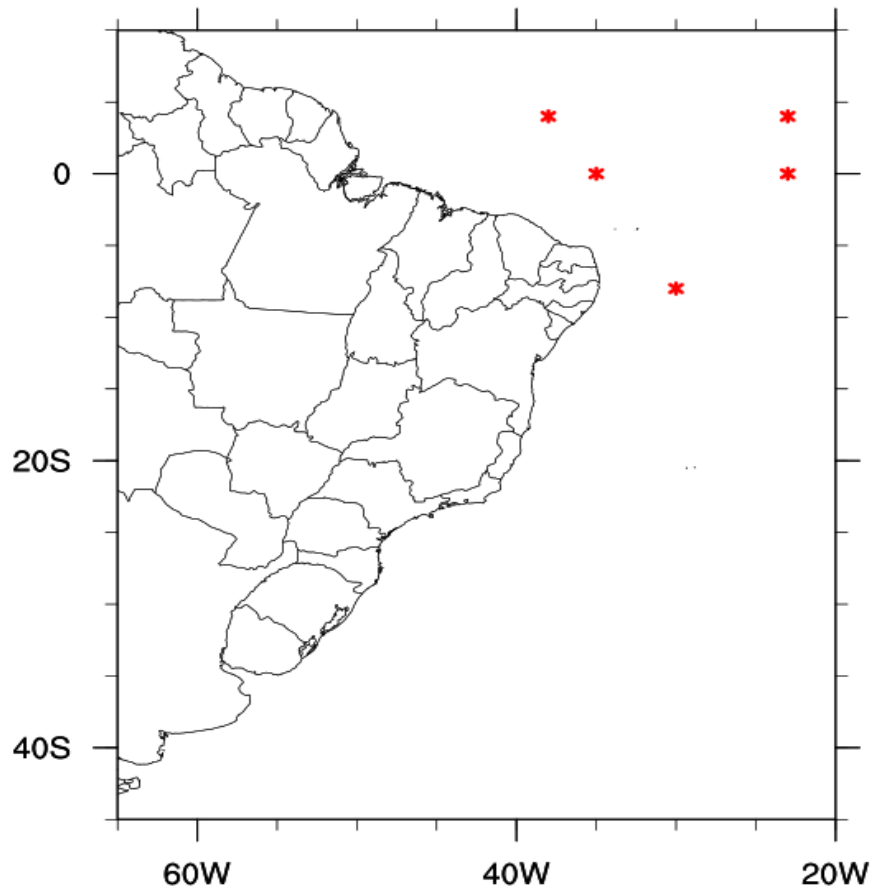


Fonte: Produção da Autora.

Também foram realizadas análises para a região entre 10°N a 10°S (Figura 4.27), comparando os produtos de TSM L3 e L4 com o PIRATA, eliminando dados com ventos de intensidade menor que  $< 6$  m/s (Tabela 4.19). Conforme visto anteriormente, o OSTIA exibiu melhores resultados. As estações escolhidas (verão e inverno) estão relacionadas à região de destaque das Figuras 4.23 e 4.24. Para a TSM ABI-GOES-16, não existe dados o suficiente para a estação do verão, devido à cobertura persistente de nuvens na ZCIT, impossibilitando a análise. De forma geral, o inverno apresentou valores mais altos em todos os critérios. Mesmo com a atuação da ZCIT e influência de aerossóis continentais, as comparações da TSM satélite L3 e L4 com a TSM in situ do programa PIRATA foram melhores do que as comparações para a costa do Rio de Janeiro e região da CBM, que são regiões mais dinâmicas e

complexas.

Figura 4.27 - Recorte da área de estudo, sinalizado em vermelho as boias do PIRATA dentro da delimitação de 10°N até 10°S



Fonte: Produção da Autora.

Tabela 4.19 - Estatística da diferença entre as médias diárias de TSM satélite do GOES-16 e OSTIA com PIRATA para dado pontual, de nível de qualidade (NQ) 3-5 (junto), para todo ano de 2018, verão e inverno, para a região entre 10°N a 10°S, vento com intensidade maior ou igual a 6 m/s: quantidade de dados (N), erro médio quadrático (EMQ), viés e erro absoluto ( $EA_x$ ).

	ABI-GOES-16				OSTIA			
	N	EMQ	Viés	$EA_x$	N	EMQ	Viés	$EA_x$
2018	222	0,383	-0,054	0,265	298	0,175	-0,103	0,134
Verão	-	-	-	-	22	0,225	-0,101	0,164
Inverno	128	0,420	-0,030	0,290	156	0,170	-0,085	0,128

### 4.3 Estudo de Caso: Ressurgência na costa do Rio de Janeiro

A ressurgência é um fenômeno onde as massas de águas mais profundas e de temperatura fria ascendem para a superfície dos oceanos, ocorrência comum na costa do Peru, Califórnia e na região de Cabo Frio, Rio de Janeiro (VALENTIN et al., 1987). Essa água fria, carregada de nutrientes, impulsiona o desenvolvimento do plânctons, servindo de alimento para os peixes, colaborando vigorosamente para a pesca local.

No Brasil, a ressurgência (também conhecida como afloramento, do inglês *upwelling*) é decorrente de ventos Nordeste-Leste (NE-E), oriundo do Anticiclone Semi-Permanente do Atlântico Sul, fazendo com que a água da superfície flua para o mar aberto e seja substituída pela água de uma profundidade de aproximadamente 300 m, mais fria (abaixo de 20° C) (SILVA et al., 2006; VALENTIN et al., 1987).

Esse vento NE-E então promove a ascensão da Água Central do Atlântico Sul (ACAS), caracterizando a ressurgência com temperaturas de 18° C ou inferior, parâmetro empregado no trabalho de Silva et al. (2006). Seu comportamento é mais duradouro no verão, devido ao Anticiclone Semi-Permanente do Atlântico Sul, por ser mais acentuado nessa estação do ano, mas ocasionalmente interrompido pela passagem de sistemas frontais. Valentin et al. (1987) define a ressurgência mais ao sul do Brasil em duas estações principais: a) primavera-verão, com ventos NE-E e anticiclone marítimo tropical e b) outono-inverno, com passagem constante de frente fria e uma sucessão rápida de mudanças nos ciclos de vento desfavoráveis à ressurgência.

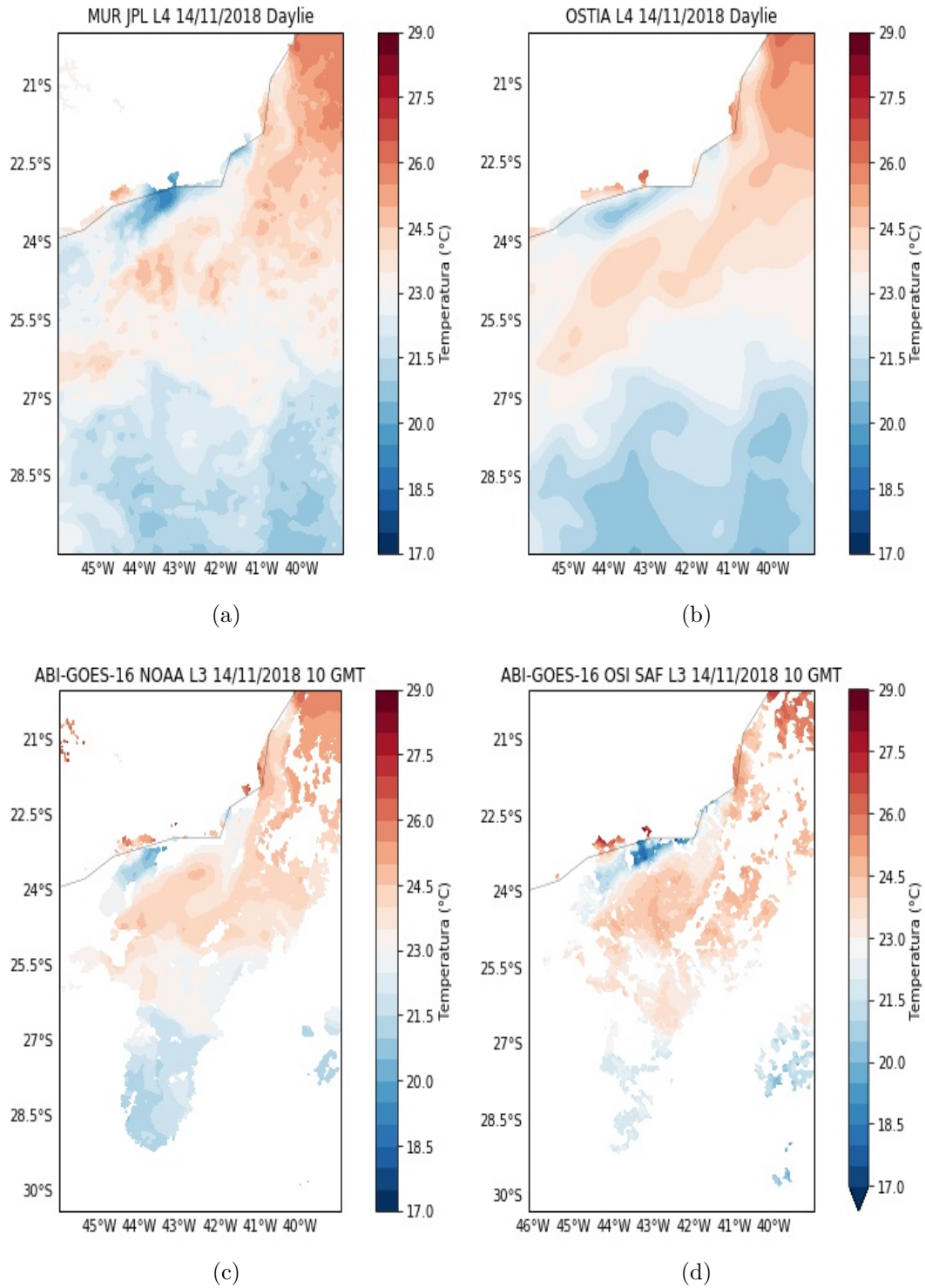
Assim, esse estudo de caso tem como objetivo a investigação da qualidade do produto de TSM do ABI-GOES-16 em representar a ressurgência na região de Cabo Frio, quando comparado com outros produtos padrões. Dos produtos selecionados estão

o nosso conhecido da pesquisa (ABI-GOES-16), seu produto na versão mais nova, do grupo NOAA-STAR ABI-GOES-16, que conta com resolução espacial de 2 km, e os produtos globais L4, OSTIA e MUR JPL, sendo o último com resolução espacial de 1 km. Maiores informações desses produtos podem ser verificadas na Tabela 3.4.

Foi então selecionada a data 14 de Novembro de 2018, devido a presença de um fenômeno de ressurgência significativo na região de Cabo Frio. Para os produtos horários como o ABI-GOES-16 OSI SAF e NOAA-STAR foram selecionados os horários 10 GMT (7h horário local), e os produtos de média diária L4 OSTIA e MUR JPL. Os mapas de TSM podem ser observados na Figura 4.28 e o valor mínimo de TSM registrado na ressurgência está descrito na Tabela 3.4.

Infelizmente, não foi possível obter dados das boias de Guanabara durante este evento para confirmar a TSM in situ, pois o mesmo não estava disponível. Porém, sabe-se que em eventos fortes de ressurgência a TSM pode chegar a 15-18 °C no litoral do RJ, sendo o valor de 18 °C ou inferior comumente usado como parâmetro de ressurgência, usados no trabalho de [Silva et al. \(2006\)](#).

Figura 4.28 - Imagem da ressurgência no Rio de Janeiro, para o dia 14/11/2018, para a) produto global MUR JPL L4, b) produto global OSTIA L4, c) produto ABI-GOES-16 NOAA L3 as 10 GMT e d) produto ABI-GOES-16 OSI SAF L3 as 10 GMT.

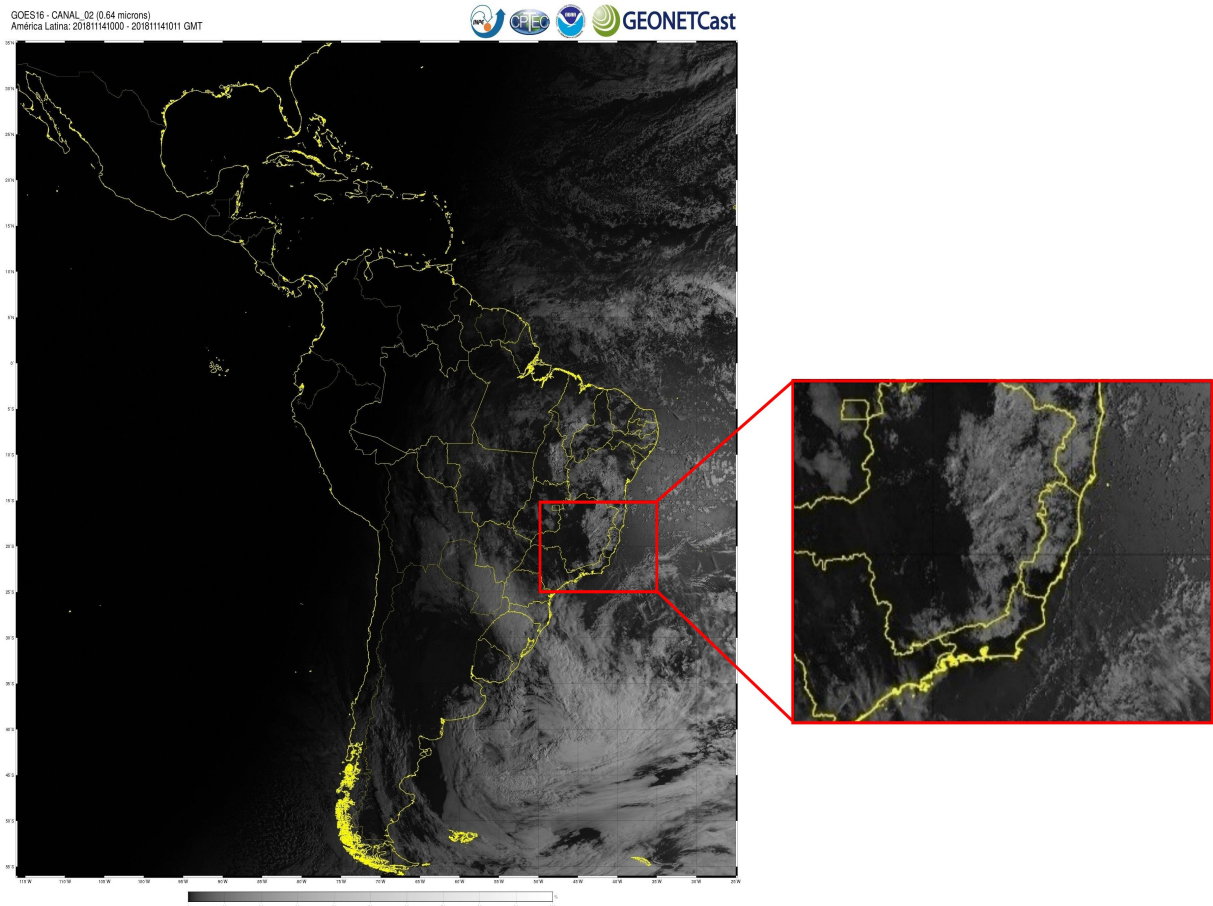


Fonte: Produção da Autora.



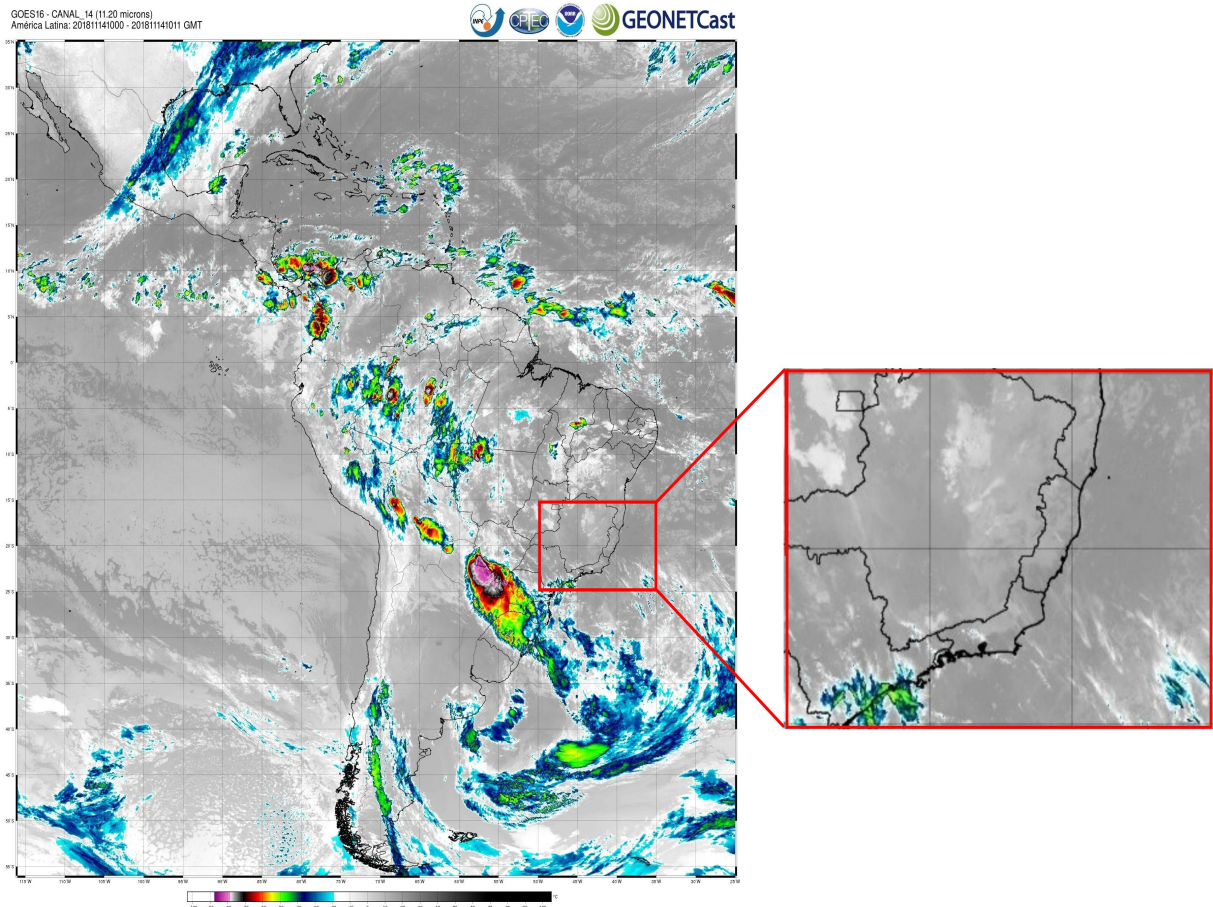
O produto ABI-GOES-16 OSI SAF, apesar da resolução espacial mais grosseira (6 km) foi o que conseguiu medir o menor valor de TSM (18,3 °C) na zona de ressurgência. Já o produto ABI-GOES-16 NOAA-STAR mascarou parte da zona de ressurgência durante o seu controle de qualidade, sendo que pela imagem no visível (Figura 4.29) e infravermelho termal (Figura 4.30) do GOES-16 não havia cobertura de nuvens extensa nessa região no mesmo horário (10 GMT), e registou temperatura mínima de TSM na ressurgência de 20 °C, maior que o ABI-GOES-16 OSI SAF.

Figura 4.29 - Imagem do satélite GOES-16 da América Latina no canal do visível (canal 2, 0,64 microns), horário 10 GMT do dia 14/11/2018.



Fonte: Adaptada de Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2020).

Figura 4.30 - Imagem do satélite GOES-16 da América Latina no canal do infravermelho (canal 14, 11,2 microns), horário 10 GMT do dia 14/11/2018.



Fonte: Adaptada de Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2020).

O produto global MUR JPL, apesar de um produto de processamento L4, possui resolução espacial melhor (1 km) do que os outros três produtos (2-6 km) e conseguiu registrar uma TSM mínima de 19,5 °C para a região da ressurgência, enquanto o produto OSTIA registrou temperatura mínima de 21 °C. Portanto, por mais que sua resolução espacial não seja maior entre os produtos estudados, e tenha muita interrupção por nuvens, o produto ABI-GOES-16 OSI SAF teve melhor desempenho em encontrar o mínimo da TSM na ressurgência, e comparado apenas com o NOAA-STAR, seu mascaramento de nuvem na região da ressurgência foi menor, principalmente próximo à costa do Rio de Janeiro. Deve destacar, que nesse estudo de caso, foram utilizados todos os níveis de qualidade dos produtos OSI SAF e NOAA-STAR, ou seja, sem eliminar dados de nível de qualidade 2, como foi nas análises anteriores. Isso porque no controle de qualidade regiões de forte gradiente termal episódicos são rejeitados, quando comparado à climatologia, sendo conside-

rado potenciais áreas contaminadas por nuvens, por exemplo. Essa é uma questão que ainda demanda pesquisa no desenvolvimento e aprimoramento do produto de TSM por satélite: melhorar a máscara de nuvens e controle de qualidade sem perder dados potencialmente bons, como no caso de ressurgências costeiras.

Outra questão a ser ressaltada é que apesar das diferenças na representatividade da camada superficial do mar entre estes produtos (sub-pele e fundação), na zona de ressurgência a camada de mistura é profunda, minimizando as diferenças da TSM. Além disso o horário selecionado de 10 GTM é o início do dia, não sofrendo influência do aquecimento diurno.

Essa diferença de temperatura resalta a importância do estudo e escolha de dados ao se realizar análises, sejam oceanográficas ou meteorológicas, pois pequenas diferenças podem influenciar no resultado final. Por exemplo, a TSM e consequentemente, a ressurgência, tem impacto importante no tempo, como na formação de nevoeiro marítimo. Regiões oceânicas de forte gradiente termal horizontal, conhecidas como *hot spots* podem ter grande influência em sistemas atmosféricos e pesquisas ainda precisam avançar nesta área identificando tais influências no tempo e clima (NAKAMURA et al., 2015).



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

Um produto de TSM com alta resolução temporal é apresentado e avaliado nesta pesquisa com enfoque no Oceano Atlântico Tropical e Sudoeste para todo período de 2018. Este produto conta com estimativa de TSM recuperado pelo sensor ABI do satélite geoestacionário GOES-16, gerado por um algoritmo de regressão não linear multicanais, e uma sequência de controle de qualidade, correção de viés com auxílio de observações in situ e saídas de modelos de previsão numérica de tempo e de transferência radiativa, em uma cadeia complexa de processamento. Embora a avaliação entre o produto e os dados in situ seja limitada devido as poucas observações de boias dentro do domínio de análise, os resultados indicam que a diferença no sistema de análise variam conforme o programa de observações in situ utilizado, com diferenças: nas regiões de abrangência i.e., PIRATA: Atlântico Tropical, PNBoia fixa: costa brasileira; PNBoia deriva: Atlântico Sudoeste; nas profundidades de amostragem (0,15-0,20 m para os derivadores e 1 e 10 m para as boias fixas); disponibilidade de dados auxiliares (vento); dados horários (PNBoia) ou diários (PIRATA); e ainda diferenças no controle de qualidade de cada programa.

Nas investigações comparativas entre os dados do produto de satélite com in situ foram realizadas 7327 análises para dados pontuais e 21688 para a janela de 5x5 pixel, fracionado entre os projetos PNBoia de deriva, PNBoia fixa e PIRATA, além das 376 análises focadas na intensidade do vento, do projeto PIRATA. Essas análises foram sistematicamente realizadas para diferentes configurações estatísticas, testando o impacto da distribuição e erro das observações. Em regiões com gradientes horizontais significativos de TSM (e.g. áreas de ressurgência e CBM, Tabelas 4.17 e 4.18, respectivamente), são identificados casos em que houve um aumento do EMQ. Em relação às diferenças nas profundidades de amostragem da TSM satélite e in situ, a utilização da técnica de controle de qualidade por intensidade do vento (Tabelas 4.14 e 4.15), mostrou-se eficaz com a redução do EMQ e  $EA_x$ , enriquecendo a eficiência estatística das análises. Sem a informação da intensidade do vento, o viés foi positivo para as médias horárias do período diurno (PNBoia fixa e deriva) revelando a maior discrepância entre a TSM sub-pele (de satélite) e TSM in situ com a estratificação termal diurna. Isso reforça que ainda que na média a TSM satélite represente a profundidade da TSM in situ (por ser ajustada a ela no modelo de regressão), a TSM satélite é sensível às variações da TSM pele e sub-pele (PETRENKO et al., 2019). Isso é uma vantagem da TSM satélite pois permite extrair informações do ciclo diurno e fluxos de calor da camada mais superficial do mar, que é importante para o monitoramento e a modelagem numérica do tempo e clima.

Além das questões da (i) estratificação diurna; e do (ii) gradiente horizontal de TSM, as análises comparativas tanto da TSM in situ como do produto L4 com a TSM ABI L3 sugeriram a influência de fatores como (iii) a contaminação de nuvens (sub-pixel e nuvens finas) em regiões sob influência de cobertura persistente de nuvens com a atuação da ZCIT e ZCAS, e/ou com maior conteúdo de vapor d'água; e ainda a (iv) contaminação de aerossóis continentais (poeira e fumaça do continente Africano) no Atlântico Tropical. Todos estes fatores aparentemente causaram os maiores desvios regionais (e temporais) na estimativa da TSM ABI GOES-16. O uso do nível de qualidade máximo (5) do produto reduz significativamente as estatísticas de erro, mas a disponibilidade de dados horários fica muito reduzida em contrapartida. Dessa forma, devem ser usados os níveis recomendados de 3-5, mas sabendo que ainda devem haver esforços para melhorar o controle de qualidade considerando os fatores citados acima. Para a TSM com NQ de 3-5 o viés médio ficou abaixo de 0,1 °C e o EMQ e erro absoluto igual ou menor que 0,5 °C, para quase todos os casos, que é o recomendado pelo GHRSSST.

Ambas análises - do produto de TSM ABI-GOES-16 com dados in situ e produtos de satélite de processamento L4 - mostram que o produto de estudo TSM ABI-GOES-16 pode fornecer benefícios significativo no fornecimento de TSM para o Brasil, embora exista a necessidade de investir na caracterização de seu viés, assim como na sua correção. Os benefícios estão em sua resolução temporal e espacial, algoritmo que utiliza recuperação em comparação com boias de deriva (corrigindo erros aleatórios), disponibilizando estatística (*quality level*) adicional para o controle de qualidade, pixel a pixel. Outro benefício é a utilização de algoritmo de correção atmosférica para eliminar a influência da absorção do vapor d'água, método conhecido como *split window*. Para o ABI-GOES-16, o algoritmo realiza uma simples subtração de canais de diferentes graus de influência da absorção do vapor d'água (8,5; 10,3 e 12,3  $\mu\text{m}$ ), tornando-o mais robusto a diferentes condições atmosféricas (PICART; MARSOUIN, 2018; MERCHANT et al., 2009).

Entretanto, existe certas penalizações - já esperadas e comprovadas durante a pesquisa, como maiores erros para o Oceano Atlântico Sul (e Tropical), devido ao pouco número de dados in situ para ser usado como fonte de recuperação e ajuste nos dados estimados pelo satélite GOES-16. Além disso, certas regiões contêm características próprias e que destacam-se nos dados de TSM, como as ressurgências costeiras, qual muitas vezes não é bem representada e ocorrendo mascaramento dessa região. Cabe ao usuário conhecer as características da região de estudo e fazer as devidas correções.

Resumidamente, o estudo desses dados sugere a que utilidade do produto TSM ABI-GOES-16 para uso em grande escala (e.g., todo oceano adjacente ao Brasil) possa ter um resultado significativamente positivo, e para uso de pequena escala (e.g., região de ressurgência, CBM), requer um maior cuidado e exige uma familiarização das condições locais, mas não exime a utilização do produto. Pelo contrário, como mostrado no estudo de caso, o produto obteve o resultado mais próximo do esperado, por mais que tivesse uma grande região mascarado. Sua versão mais nova gerado pelo grupo NOAA-STAR (i.e. ABI-GOES-16 NOAA-STAR) possui maior resolução espacial (2 km) e apesar de mascarar fenômenos importantes, como a ressurgência costeira observada no estudo de caso do Rio de Janeiro, pode ter um potencial de uso nas diversas aplicações, que precisa ser avaliada em trabalhos futuros.

As questões óbvias para futuras pesquisas podem ser expostas, como: qual o viés de produtos de TSM ABI de resolução espacial menor que 6 km? Como seria o comportamento desses dados se fossem utilizados na assimilação de modelos oceânico e atmosféricos acoplados? Os aspectos a serem considerados: a natureza de TSM quando analisados por período noturno e diurno, separadamente. Melhorar a máscara de nuvens utilizando os novos canais do sensor ABI; bem como a correção da influência dos aerossóis continentais (poeira e fumaça); melhorar a correção do viés regional com melhor representatividade de regiões sub-amostradas (ex.: [Petrenko et al. \(2019\)](#)); testar técnicas que contornem melhor o problema do gradiente horizontal para as comparações de TSM satélite e in situ, em regiões de forte gradiente (como em [Assireu et al. \(2011\)](#), usando o pixel mais quente da janela amostral); analisar a representatividade da variação da TSM satélite em função do ciclo diurno e aplicações dessa informações em estudos de interação oceano-atmosfera e em modelos de PNT.





## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIREU, A. T.; FREITAS, R. M.; LORENZZETTI, J. A. Validação da TSM estimada pelo MODIS na região Nordeste do Oceano Atlântico Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba, PR, Brasil. **Anais...** [S.l.], 2011. p. 7037–7043. 48, 49, 59, 82, 109

BORGNE, P.; MARSOUIN, A.; ORAIN, F.; HERVÉ, R. Operational sea surface temperature bias adjustment using aatsr data. **Remote Sensing of Environment**, v. 116, 01 2012. 14, 33, 97

BORGNE, P. L.; ROQUET, H.; MERCHANT, C. Estimation of sea surface temperature from the spinning enhanced visible and infrared imager, improved using numerical weather prediction. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 1, p. 55 – 65, 2011. ISSN 0034-4257. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425710002348>>. 14, 33, 97

CHELTON, D. B.; WENTZ, F. J. Global microwave satellite observations of sea surface temperature for numerical weather prediction and climate research. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 86, n. 8, p. 1097–1116, aug 2005. ISSN 0003-0007. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-86-8-1097>>. 36

CHIN, T. M.; VAZQUEZ-CUERVO, J.; ARMSTRONG, E. M. A multi-scale high-resolution analysis of global sea surface temperature. **Remote Sensing of Environment**, v. 200, p. 154–169, oct 2017. ISSN 00344257. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.029>><<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425717303462>>. 17, 45

DONLON, C. J. Global Ocean Data Assimilation Experiment (GODAE) High Resolution Sea Surface Temperature Pilot Project (GHRSSST-PP). **GHRSSST-PP Science Team**, v. 22, n. 3, p. 34–47, 2015. 3

DONLON, C. J.; MARTIN, M.; STARK, J.; ROBERTS-JONES, J.; FIEDLER, E.; WIMMER, W. The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) system. **Remote Sensing of Environment**, v. 116, p. 140–158, jan 2012. ISSN 00344257. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425711002197>>. 1, 2, 14, 17, 18, 19, 34, 35, 36, 38, 42, 48, 82, 84

DONLON, C. J.; MINNETT, P. J.; GENTEMANN, C.; NIGHTINGALE, T. J.; BARTON, I. J.; WARD, B.; MURRAY, M. J. Toward improved validation of satellite sea surface skin temperature measurements for climate research. **Journal of Climate**, v. 15, n. 4, p. 353–369, feb 2002. ISSN 0894-8755. Disponível em: <[http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0442\(2002\)29015:3C0353:3ATIVOSS%3E2.0.CO;3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0442(2002)29015:3C0353:3ATIVOSS%3E2.0.CO;3B2)>. 1, 2, 3, 9, 11, 12, 42, 48, 59, 60, 82, 97

DONLON, C. J.; NIGHTINGALE, T. J.; SHEASBY, T.; TURNER, J.; ROBINSON, I. S.; EMERGY, W. J. Implications of the oceanic thermal skin temperature deviation at high wind speed. **Geophysical Research Letters**, v. 26, n. 16, p. 2505–2508, 1999. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/1999GL900547>>. 12

DOURADO, M. S.; CALTABIANO, A. C. V. Oceanografia por satélites. In: SOUZA, R. B. de (Ed.). **Novos conceitos na definição da temperatura da superfície do mar**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p. 150–165. 11, 12

ELÍA, R. de; ZAWADZKI, I. Sidelobe contamination in bistatic radars. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 17, n. 10, p. 1313–1329, oct 2000. ISSN 0739-0572. Disponível em: <[http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0426\(2000\)29017:3C1313:3ASCIBR%3E2.0.CO;3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0426(2000)29017:3C1313:3ASCIBR%3E2.0.CO;3B2)>. 17

EMERY, W.; YU, Y.; WICK, G.; SCHLUESSEL, P. Correcting infrared satellite estimates of sea surface temperature for atmospheric water. **Geoscience and Remote Sensing Symposium**, p. 571–575, 1994. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs/\\_all.jsp?arnumber=399187%5Cnpapers3://publication/uuid/07CBA5F9-E3B0-4F13-AE22-26C5C3BBD940](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs/_all.jsp?arnumber=399187%5Cnpapers3://publication/uuid/07CBA5F9-E3B0-4F13-AE22-26C5C3BBD940)>. 17

EMERY, W. J.; BALDWIN, D. J.; SCHLÜSSEL, P.; REYNOLDS, R. W. Accuracy of in situ sea surface temperatures used to calibrate infrared satellite measurements. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 106, n. C2, p. 2387–2405, feb 2001. ISSN 01480227. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2000JC000246>>. 13

EUMETSAT OSI SAF MANUAL. **Geostationary sea surface temperature product user manual**. 2018. Disponível em: <[http://www.osi-saf.org/lml/doc/osisaf\\_cdop2\\_ss1\\_pum\\_geo\\_sst.pdf](http://www.osi-saf.org/lml/doc/osisaf_cdop2_ss1_pum_geo_sst.pdf)>. Acesso em: 15 fev. 2019. 31, 32, 33, 34, 42, 50, 84

EUMETSAT/OSI SAF. **GHRSSST level 3C sub-skin sea surface temperature from the Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES 16) Advanced Baseline Imager (ABI) in East position (GDS V2)**. 2018. Disponível em:

<<https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/GOES16-OSISAF-L3C-v1.0>>. Acesso em: 15 fev. 2019. 4, 31

EYRE, J. R. **Planet Earth seen from space: basic concepts**. Bracknell: ECMWF Library, 2000. 5–20 p. 1, 14, 15

FOLLAND, C. K.; PARKER, D. E. Correction of instrumental biases in historical sea surface temperature data. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 121, n. 522, p. 319–367, jan 1995. ISSN 00359009. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/qj.49712152206>>. 18

FRANÇOIS, C.; BRISSON, A.; BORGNE, P. L.; MARSOUIN, A. Definition of a radiosounding database for sea surface brightness temperature simulations: application to sea surface temperature retrieval algorithm determination. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, n. 2, p. 309 – 326, 2002. ISSN 0034-4257.

Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425702000081>>. 32

GHRSSST SCIENCE TEAM. **The recommended GHRSSST Data Specification (GDS) 2.0, document revision 4**. [S.l.]: Silver Spring: NOAA, 2011. 2, 9, 20, 33, 34, 48

GLOBAL OCEAN OBSERVING SYSTEM DO BRASIL. **Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic**. 2019. Disponível em: <<http://www.goosbrasil.org/pirata/dados/>>. Acesso em: 10 mar. 2019. 27

\_\_\_\_\_. **Programa Nacional de Boias**. 2019. Disponível em: <<http://www.goosbrasil.org/pnboia/dados/>>. Acesso em: 10 mar. 2019. 29

IGNATOV, A. GOES-R Advanced Baseline Imager (ABI) algorithm theoretical basis document for sea surface temperature. 2010. Disponível em: <<https://www.star.nesdis.noaa.gov/goesr/docs/ATBD/SST.pdf>>. 4, 31

INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT. **PIRATA**. Disponível em: <<http://www.brest.ird.fr/pirata/pirata.php>>. Acesso em: 21 ago. 2019. 26, 27

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Oceanografia e interação oceano-atmosfera**. 2018. Disponível em:  
<[http://www.inpe.br/crs/pan/projetos\\_pesquisas/oceanografia.php](http://www.inpe.br/crs/pan/projetos_pesquisas/oceanografia.php)>.  
Acesso em: 13 nov. 2019. 89

\_\_\_\_\_. **Divisão de Satélite e Sistemas Ambientais**. 2020. Disponível em:  
<<http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes16.formulario.logic>>.  
Acesso em: 20 jan. 2020. 103, 104

JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY. **New geostationary meteorological satellites — Himawari-8/9**. 2015. Disponível em:  
<[http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/satellite/materials/Himawari89/himawari89\\_leafret2/201507\\_leaflet89.pdf](http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/satellite/materials/Himawari89/himawari89_leafret2/201507_leaflet89.pdf)>. Acesso em: 15 mar. 2019. 37

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MO, K. C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, R.; JENNE, R.; JOSEPH, D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, n. 3, p. 437–472, 1996. Disponível em:  
<[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)>.  
xiii, 8, 9

KENT, E. C.; TAYLOR, P. K. Toward estimating climatic trends in SST. part I: methods of measurement. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 23, n. 3, p. 464–475, mar 2006. ISSN 0739-0572. Disponível em:  
<<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JTECH1843.1>>. 18, 48, 82

LAZARUS, S. M.; CALVERT, C. G.; SPLITT, M. E.; SANTOS, P.; SHARP, D. W.; BLOTTMAN, P. F.; SPRATT, S. M. Real-time, high-resolution, space–time analysis of sea surface temperatures from multiple platforms. **Monthly Weather Review**, v. 135, n. 9, p. 3158–3173, sep 2007. ISSN 0027-0644.  
Disponível em:  
<<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/MWR3465.1>>. 2, 3, 48, 60

LIMA, R. **Identificação de outliers em conjuntos de dados**. 2016. Disponível em: <<http://aprendendogestao.com.br/identificacao-de-outliers/>>.  
Acesso em: 26 mar. 2019. 40

MARINHA DO BRASIL. **Plano nacional de trabalho (2013-2017)**.

Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/u1947/pnt-pnboia.pdf>>. Acesso em: 21 ago. 2019. 28

\_\_\_\_\_. **Histórico de vandalismo nas boias do PNBoia**. 2018. Disponível em: <[https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/u1947/vandalismo\\_-\\_pnboia\\_2018.pdf](https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/u1947/vandalismo_-_pnboia_2018.pdf)>. Acesso em: 21 ago. 2019. 28

MERCHANT, C. J.; BORGNE, P. L.; ROQUET, H.; MARSOUIN, A. Sea surface temperature from a geostationary satellite by optimal estimation. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 2, p. 445–457, 2009. ISSN 0034-4257.

Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425708003271>>. 13, 108

MINNETT, P.; ALVERA-AZCÁRATE, A.; CHIN, T.; CORLETT, G.; GENTEMANN, C.; KARAGALI, I.; LI, X.; MARSOUIN, A.; MARULLO, S.; MATURI, E.; SANTOLERI, R.; PICART, S. S.; STEELE, M.; VAZQUEZ-CUERVO, J. Half a century of satellite remote sensing of sea-surface temperature. **Remote Sensing of Environment**, v. 233, p. 111366, 2019. ISSN 0034-4257. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425719303852>>. 1, 17, 20

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A. **Introduction to linear regression analysis**. New York: John Wiley and Sons, 1992. 43

NAKAMURA, H.; ISOBE, A.; MINOBE, S.; MITSUDERA, H.; NONAKA, M.; SUGA, T. “Hot Spots” in the climate system—new developments in the extratropical ocean–atmosphere interaction research: a short review and an introduction. **Journal of Oceanography**, v. 71, n. 5, p. 463–467, 10 2015. ISSN 0916-8370. 105

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **GOES-R series data book**. Greenbelt, Maryland, 2019. 240 p. Disponível em: <<https://www.goes-r.gov/downloads/resources/documents/GOES-RSeriesDataBook.pdf>>. 30

\_\_\_\_\_. **GIOVANNI**. 2020. Disponível em: <<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>>. Acesso em: 10 fev. 2020. 24, 54, 76

- \_\_\_\_\_. **Worldview**. 2020. Disponível em:  
<<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>>. Acesso em: 10 jan. 2020. 88
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **PIRATA northeast extension**. Disponível em:  
<<https://www.aoml.noaa.gov/phod/pne/pirata.php>>. Acesso em: 21 ago. 2019. 26
- OFFICE OF SATELLITE PRODUCTS AND OPERATIONS. **GHRSSST Level 4 OSPO global foundation sea surface temperature analysis (GDS version 2)**. 2015. Disponível em: <[https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/Geo\\_Polar\\_Blended-OSPO-L4-GLOB-v1.0?ids=Platform&values=GOES-16](https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/Geo_Polar_Blended-OSPO-L4-GLOB-v1.0?ids=Platform&values=GOES-16)>. Acesso em: 15 fev. 2019. 2, 37
- PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W. R. **Análise de imagens digitais: princípios, algoritmos e aplicações**. [S.l.]: Thomson Learning, 2007. 528 p. ISBN 978-85-221-0595-3. 44
- PETRENKO, B.; IGNATOV, A.; KIHAI, Y.; HEIDINGER, A. Clear-sky mask for the advanced clear-sky processor for oceans. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 27, n. 10, p. 1609–1623, 2010. ISSN 07390572. 13, 60
- PETRENKO, B.; IGNATOV, A.; KIHAI, Y.; STROUP, J.; DASH, P. Evaluation and selection of SST regression algorithms for JPSS VIIRS. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 119, n. 8, p. 4580–4599, apr 2014. ISSN 2169897X. Disponível em:  
<<http://doi.wiley.com/10.1002/2013JD020637>>. 37
- PETRENKO, B.; IGNATOV, A.; KIHAI, Y.; PENNYBACKER, M. Optimization of sensitivity of GOES-16 ABI sea surface temperature by matching satellite observations with L4 analysis. **Remote Sensing**, v. 11, p. 16, 2019. 13, 20, 34, 45, 48, 56, 84, 94, 107, 109
- PETTY, G. W. **A first course in atmospheric radiation**. 2. ed. [S.l.]: Sundog Publishing, 2006. ISBN 978-0972903318. 16
- PEZZI, L. P.; SOUZA, R. B.; DOURADO, M. S.; GARCIA, C. A. E.; MATA, M. M.; SILVA-DIAS, M. A. F. Ocean-atmosphere in situ observations at the brazil-malvinas confluence region. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 22, 2005. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2005GL023866>>. 49, 89

PICART, S. S.; MARSOUIN, A. **Geostationary satellite sea surface temperature scientific validation report**. 2018. Disponível em: <[http://www.osi-saf.org/lml/doc/osisaf\\_cdop2\\_ss1\\_geo\\_sst\\_val\\_rep.pdf](http://www.osi-saf.org/lml/doc/osisaf_cdop2_ss1_geo_sst_val_rep.pdf)>. Acesso em: 01 jul. 2019. 13, 33, 44, 47, 48, 50, 84, 89, 93, 97, 108

PORTAL ACTION. **Coeficiente de determinação**. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/analise-de-regressao/16-coeficiente-de-determinacao>>. Acesso em: 15 jun. 2019. 43

\_\_\_\_\_. **Medidas de dispersão**. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/estatistica-basica/22-medidas-de-dispersao>>. Acesso em: 15 jun. 2019. 43

REMOTE SENSING SYSTEMS. **REMSS**. 2020. Disponível em: <<http://www.remss.com/>>. Acesso em: 10 fev. 2020. 25

REVERDIN, G.; BOUTIN, J.; MARTIN, N.; LOURENCO, A.; BOURUET-AUBERTOT, P.; LAVIN, A.; MADER, J.; BLOUCH, P.; ROLLAND, J.; GAILLARD, F.; LAZURE, P. Temperature measurements from surface drifters. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 27, n. 8, p. 1403–1409, aug 2010. ISSN 0739-0572. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2010JTECH0741.1>>. 28

REYNOLDS, R. W.; RAYNER, N. A.; SMITH, T. M.; STOKES, D. C.; WANG, W. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. **Journal of Climate**, v. 15, n. 13, p. 1609–1625, jul 2002. ISSN 0894-8755. Disponível em: <[http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0442\(2002\)15<1609:JCLI1824.1](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0442(2002)15<1609:JCLI1824.1)>. 13, 19

REYNOLDS, R. W.; SMITH, T. M.; LIU, C.; CHELTON, D. B.; CASEY, K. S.; SCHLAX, M. G. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. **Journal of Climate**, v. 20, n. 22, p. 5473–5496, nov 2007. ISSN 0894-8755. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2007JCLI1824.1>>. 48

SAUNDERS, P. M. The temperature at the ocean-air interface. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 24, n. 3, p. 269–273, 1967. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1967\)024<0269:TTATOA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1967)024<0269:TTATOA>2.0.CO;2)>. 11

SERVAIN, J.; BUSALACCHI, A. J.; MCPHADEN, M. J.; MOURA, A. D.; REVERDIN, G.; VIANNA, M.; ZEBIAK, S. E. A Pilot Research Moored Array in the Tropical Atlantic (PIRATA). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, n. 10, p. 2019–2032, 1998. Disponível em:

<[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<2019:APRMAI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<2019:APRMAI>2.0.CO;2)>. 26, 28

SILVA, G. L. d.; DOURADO, M. S.; CANDELLA, R. N. Estudo preliminar da climatologia da ressurgência na região de Arraial do Cabo, RJ. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina. **Anais...** 2006. p. 1–11. (INPE-10533-PRE/6005). Disponível em: <[http://www.enapet.ufsc.br/anais/ESTUDO\\_PRELIMINAR\\_DA\\_CLIMATOLOGIA\\_DA\\_RESSURGENCIA\\_NA\\_REGIAO\\_DE\\_ARRAIAL\\_DO\\_CABO\\_RJ.pdf](http://www.enapet.ufsc.br/anais/ESTUDO_PRELIMINAR_DA_CLIMATOLOGIA_DA_RESSURGENCIA_NA_REGIAO_DE_ARRAIAL_DO_CABO_RJ.pdf)>. 100, 101

SMITH, N. **Report of the GODAE high resolution SST workshop**. [S.l.]: GODAE, 2001. 64 p. 2

SOUZA, R. B.; LORENZZETTI, J. A.; LUCCA, E. V. D. Oceanografia por satélites. In: SOUZA, R. B. (Ed.). **Estimativas da temperatura da superfície do mar através do sensoriamento remoto no infravermelho**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p. 115–130. 1, 2, 3, 4, 12, 15, 16

SOUZA, R. B. de; ROBINSON, I. S. Lagrangian and satellite observations of the brazilian coastal current. **Continental Shelf Research**, v. 24, n. 2, p. 241 – 262, 2004. ISSN 0278-4343. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278434303001912>>. 66

STECH, J. L. Oceanografia por satélites. In: SOUZA, R. B. de (Ed.). **Assimilação de dados de vento sobre a superfície dos oceanos em modelos de circulação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p. 21–34. 7

TALLEY, L. D.; PICKARD, G. L.; EMERY, W. J.; SWIFT, J. H. **Descriptive physical oceanography: an introduction**. 6. ed. Londres, Inglaterra: Elsevier, 2011. 560 p. ISBN 978-0-7506-4553-2. 2, 7, 8, 9, 11, 16, 18

THÉPAUT, J.-n. Satellite data assimilation in numerical weather prediction : an overview. **ECMWF**, p. 8–12, 2003. 15

UK MET OFFICE. **GHRSSST level 4 OSTIA global foundation sea surface temperature analysis (GDS version 2)**. 2012. Disponível em:



<<https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/OSTIA-UKMO-L4-GLOB-v2.0>>. Acesso em: 15 fev. 2019. 35

VALENTIN, J. L.; ANDRE, D. L.; JACOB, S. A. Hydrobiology in the Cabo Frio (Brazil) upwelling: two-dimensional structure and variability during a wind cycle. **Continental Shelf Research**, v. 7, n. 1, p. 77 – 88, 1987. ISSN 0278-4343.

Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0278434387900653>>. 100

VAZQUEZ, J.; PERRY, K.; KILPATRICK, K. **NOAA/NASA AVHRR oceans Pathfinder sea surface temperature data set: user's reference manual, versão 4.0**. 1998. Disponível em: <[https://www.nodc.noaa.gov/woce/woce\\_v3/wocedata\\_2/sat\\_sst/avhrr/docs/usr\\_gde4\\_0.htm](https://www.nodc.noaa.gov/woce/woce_v3/wocedata_2/sat_sst/avhrr/docs/usr_gde4_0.htm)>. 12

ZHANG, H.-M.; REYNOLDS, R. W.; SMITH, T. M. Adequacy of the in situ observing system in the satellite Era for climate SST. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 23, n. 1, p. 107–120, jan 2006. ISSN 0739-0572.

Disponível em:

<<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JTECH1828.1>>. 18

